

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS NUNES SILVA

**APLICAÇÃO DE LASER SCANNER TERRESTRE PARA DETERMINAÇÃO DE
VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS EM *PINUS* SPP**

CURITIBA

2011

MATHEUS NUNES SILVA

**APLICAÇÃO DE LASER SCANNER TERRESTRE PARA DETERMINAÇÃO DE
VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS EM *PINUS* SPP**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal, Departamento de Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.Orientadora:

Prof^a. Dr^a. Christel Lingnau.

Prof^o. Dr^o Álvaro Muriel Lima Machado

CURITIBA

2011

Aos meus avós (*in memoriam*)
dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao longo da trajetória de formação tanto acadêmica quanto pessoal, deparamos com inúmeras pessoas que de suas formas mais diversas nos foram ensinando um pouco do que sabem.

Infelizmente não é possível enumerar cada uma. Porém, neste momento da vida em que se construiu este trabalho há algumas pessoas que devem ser mencionadas, seja pela contribuição com o estudo, ou pela compreensão, paciência e conselhos.

Inicialmente agradeço a Universidade Federal do Paraná e ao curso de pós graduação em Engenharia Florestal pelo ensino gratuito e de qualidade existente. Em especial, não posso deixar de agradecer a todos os mestres que nos passaram seus conhecimentos ao longo desses dois anos de estudos. Igualmente sou grato aos meus orientadores, professora Dr. Christel Lingnau e professor Dr. Álvaro Muriel Lima Machado, pelos momentos de discussão na construção da dissertação.

Ao colega e amigo André Leonardo Bortolotto Buck, companheiro de mestrado, pelos momentos de discussão, coleta de dados e programação.

Aos estagiários do Laboratório de Geoprocessamento Rorai Pereira Martins Neto e Alexandre Braghini pela ajuda.

Ao professor Sebastião do Amaral Machado e a equipe do Laboratório de Dendrometria pelo empréstimo de materiais extremamente necessários para coleta de dados.

A minha família, Thésio Silva Júnior, Helena de Fátima Nunes Silva e Aline Nunes Silva pelas discussões e opiniões que contribuíram para o crescimento do trabalho.

A Patrícia Paiva de Souza pela paciência e ajuda na melhoria das figuras confeccionadas.

RESUMO

O uso de dados *laser scanner* terrestre é uma ferramenta importante para coleta de dados tridimensionais. Esta dissertação teve como objetivo utilizar dados obtidos por meio de varredura simples e múltipla para a mensuração de árvores validando os resultados com valores paramétricos e comparar com os resultados de dados dendrométricos medidos de forma tradicional. A coleta de dados tradicionais, *laser scanner* terrestre e paramétricos foi realizada em 12 árvores de *Pinus* spp.. As medidas tradicionais foram diâmetros ao longo do fuste medidos com a árvore derrubada com suta e fita métrica e altura total com hipsômetro Vertex III. As medidas paramétricas foram a altura total das árvores medidas com trena após a derrubada, fotografias digitais classificadas de cortes transversais em alturas específicas e volume determinado por xilômetro das três primeiras toras de um metro. O processamento de dados *laser* consistiu na filtragem manual das árvores para obtenção dos fustes e a criação e programação de algoritmos para determinação das variáveis dendrométricas. Para obtenção da altura total das árvores aplicou-se um único método de processamento *laser* tanto para varreduras múltiplas como simples. Testaram-se quatro métodos de obtenção de diâmetros pelo processamento *laser* (Distância Máxima, Circunferência Ótima, Área *Laser* e Área *Laser* Modificado), sendo que os quatro foram aplicados nas varreduras múltiplas e três nas varreduras simples totalizando um total de 9 combinações de métodos e modelos de varredura. Os volumes das três primeiras toras foram determinados pelo método de *Smalian*, *Huber* e *Newton* e comparados com a cubagem rigorosa por medidas tradicionais e com o xilômetro. Os resultados indicaram que alguns pontos da árvore são problemáticos para a filtragem como é o caso da base e das copas. A ocorrência de vento no momento da aquisição de dados é um fator limitante principalmente em varreduras múltiplas. As alturas obtidas pelo processamento *laser*, utilizando dados de varredura simples ou múltipla, foram superiores aos obtidos pelo hipsômetro Vertex III. Porém, não existiram diferenças estatísticas (*Tukey* $\alpha = 0,05$) entre os resultados *laser*, medidas tradicionais e o valor paramétrico. Para os diâmetros e áreas transversais quando comparados com a área transversal real apenas um dos métodos *laser* propostos diferiu estatisticamente dos resultados das medidas tradicionais e do valor paramétrico. Conclui-se que a partir da altura onde existe um adensamento de copas tornou-se inviável a modelagem com o *laser*. Para os volumes, o método de *Huber* foi o mais eficiente para as primeiras toras utilizando dados *laser*. Os métodos de *Newton* e *Smalian* não são indicados para a volumetria da primeira tora, pois esta sofre muita influência da filtragem da base das árvores. Estatisticamente, eliminando o método de *Smalian* e *Newton* para a primeira tora, as medidas *laser*, tradicionais e paramétricas são iguais pelo teste de *Tukey* a 5% de significância. Embora em geral não existam diferenças estatísticas entre varreduras simples e múltiplas em comparação com medidas tradicionais e paramétricas, os resultados de varredura múltipla tem menor erro absoluto e menor variância de resultados sendo indicado o uso principalmente para obtenção de diâmetro e áreas transversais nas partes mais altas das árvores.

Palavras chave: Mensuração florestal; Métodos de processamento *laser*

ABSTRACT

The use of terrestrial *laser scanner* data is an important tool for collecting three-dimensional data. This paper aims to use data obtained from single and multiple scan for measuring trees, validating the results with parametric values and comparing them with traditionally measured data. The data collected from traditional, parametric and terrestrial *laser scanner* measuring were taken from 12 *Pinus* spp. trees. The traditional measurement were the diameters taken along the stem of overturned trees by both tape measure and caliper; and the height, taken through a Vertex III hypsometer. The parametric measures were the total height of the trees, that were measured by tape after the overthrow; classified digital photographs from cross-sections taken at determined heights; and their volumes, determined by means of xylometer from their first three one meter logs. The *laser* data processing consisted of a manual filtering in order to obtain the tree stems and the creation and programming of algorithms for the determination of dendrometric variables. With the aim to obtain the total height of the trees, it was applied a single *laser* processing method for both simple and multiple scans. Four methods were tested to obtain the diameters by *laser* processing; the four of them were applied on multiple scans and three of them on simple scan, comprising a total of nine combinations of methods and sweeping models. The volumes of the first three logs were determined by the method of *Smalian*, *Huber* and *Newton* and compared with the scaling obtained by traditional measurements and xylometer. The results indicated that some points of the tree are problematic for the filtering, such as the base and the canopy. The occurrence of winds at the time of data acquisition is a limiting factor, particularly in multiple scans. The heights obtained by *laser* scan processing, using data from single or multiple scan, were better than those obtained by the Vertex III hypsometer. However, there were no statistical differences (*Tukey* $\alpha = 0,05$) between the *laser* output, the traditional measurements and the parametric value. For the diameters and cross-sectional areas, when compared to the real cross-sectional area, only one of the proposed *laser* methods differed significantly from the results of the traditional measurements and the parametric value. We conclude that from the height where there is a densification of crowns, it became unviable the modeling by means of terrestrial *laser scanner*. For the volumes, the *Huber* method is the most efficient for the first log data using *laser*. The methods of *Newton* and *Smalian* are not prescribed for the volumetry of the first log, because it suffers a strong influence from the base filtering. Statistically, rejecting the *Smalian* and *Newton* method for the first log, *laser* measurements, traditional and parametric values are equal according to the *Tukey* test at 5% significance level. Although in general there are not statistical differences between single and multiple scans compared to traditional measurements and parameters, the results of multiple scans presents a lesser absolute error and lesser variance of results, being indicated mainly for the obtention of the diameters and cross-section areas of the higher parts of trees.

Key-words: Forest Measurement; *Laser* processing methods

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – FUNCIONAMENTO DE UM <i>LASER</i> TEMPO DE VÔO	20
FIGURA 2 - VARREDURA <i>LASER SCANNER</i> . A UNIÃO DE DUAS VARREDURAS SIMPLES (A E B) ORIGINA DADOS DE VARREDURRA MULTIPLA.	27
FIGURA 3 – METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO DE ÁRVORES	30
FIGURA 4 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DA METODOLOGIA DE TRABALHO	40
FIGURA 5 – LOCALIZAÇÃO DO POVOAMENTO EM ESTUDO. ACIMA, DO LADO DIREITO, OS MAPAS DO BRASIL, PARANÁ E DA CIDADE DE CURITIBA. À ESQUERDA IMAGEM AÉREA COM COORDENADAS DO POVOAMENTO. À DIREITA E ABAIXO FOTOGRAFIA DO TALHÃO.....	41
FIGURA 6 – <i>LASER SCANNER</i> TERRESTRE HDS 3000	42
FIGURA 7 – ALVOS PLANO REFLETORES UTILIZADOS NO LEVANTAMENTO <i>LASER</i>	44
FIGURA 8 – HIPSÔMETRO VERTEX III	45
FIGURA 9 – SUTA HAGLOF MANTAX.....	45
FIGURA 10 – XILÔMETRO.....	46
FIGURA 11 – DIÂMETROS MEDIDOS A CADA 0,5 M PARA CALCULO DOS DEMAIS MÉTODOS DE CUBAGEM	51
FIGURA 12 – BASE CRIADA PARA FOTOGRAFAR AS FATIAS	52
FIGURA 13 – FOTOGRAFIA DE UMA FATIA.....	52
FIGURA 14: DEMONSTRAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DIGITAL DAS FOTOGRAFIAS.....	55
FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO DA IDENTIFICAÇÃO DA BASE DAS ÁRVORES (COTA ZERO) E DO TOPO (MAIOR COTA)	59
FIGURA 16 – ALGORITMO DO MÉTODO DISTÂNCIA MÁXIMA PARA MEDIÇÃO DE DIÂMETROS	61
FIGURA 17 – AJUSTE DA CIRCUNFERÊNCIA ÓTIMA (CO)	63
FIGURA 18 – PROCEDIMENTO PARA O CÁLCULO DA CIRCUNFERÊNCIA ÓTIMA (CO)	63
FIGURA 19 – FORMA FINAL QUE TOMAM AS FATIAS APÓS A APLICAÇÃO DO MÉTODO AL.	65

FIGURA 20 – PROCEDIMENTO DE FUNCIONAMENTO DO MÉTODO ÁREA LASER	65
FIGURA 21 – FORMA FINAL QUE TOMAM AS FATIAS APÓS A APLICAÇÃO DO MÉTODO ALM NA MESMA FATIA APLICADA NO MÉTODO AL.	67
FIGURA 22 – PROCEDIMENTO DE FUNCIONAMENTO DO MÉTODO ÁREA LASER MODIFICADO (ALM).	67
FIGURA 23 – PÁGINA INICIAL DO PROGRAMA DENDROLASER.	78
FIGURA 24 - RESULTADO DO ISOLAMENTO E FILTRAGEM DA ÁRVORE 3. EXEMPLIFICANDO O RESULTADO DAS DEMAIS ÁRVORES UTILIZANDO VARREDURA MÚLTIPLA OU SIMPLES.....	79
FIGURA 25 - IDENTIFICAÇÃO DE PROBLEMAS OCASIONADOS PELO VENTO. EXEMPLOS DA ÁRVORE 3 À ESQUERDA E ÁRVORE 7 À DIREITA.	80
FIGURA 26 - EFEITO DA COPA GERANDO BAIXA DENSIDADE DE PONTOS NAS PARTES SUPERIORES DO FUSTE. ÁRVORE 6 A ESQUERDA E 11 A DIREITA.	80
FIGURA 27 - DETALHE DE FATIA COM EFEITO DO VENTO.	81
FIGURA 28 - QUALIFICAÇÃO DOS ERROS ENCONTRADOS NA FILTRAGEM PARA VARREDURA SIMPLES E MÚLTIPLA.....	82
FIGURA 29 - DISTRIBUIÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA TOTAL EM RELAÇÃO AO VALOR PARAMÉTRICO DA TRENA (REFERÊNCIA) APÓS A DERRUBADA DA ÁRVORE.....	85
FIGURA 30 - FORMATO DA NUVEM DE PONTOS A 1,3 M DA ÁRVORE 4 E 7.	91
FIGURA 31 - INFLUÊNCIA DO VENTO EM DUAS FATIAS DA ÁRVORE 3	94
FIGURA 32 - GRÁFICO DE ERROS DO MELHOR MÉTODO DE VARREDURA SIMPLES E MÚLTIPLA COMPARADOS COM MEDIDAS TRADICIONAIS EM RELAÇÃO AO VALOR PARAMÉTRICO DA IMAGEM DA FATIA CLASSIFICADA.	96
FIGURA 33 - PERFIL DE CADA ÁRVORE MEDIDO PELA SUTA, FITA E MELHORES MÉTODOS LASER. AS LINHAS PARALELAS AO EIXO Y INDICAM O INÍCIO DAS COPAS DAS ÁRVORES.....	106
FIGURA 34 - PERFIL DE CADA ÁRVORE MEDIDO PELA SUTA, FITA E MELHORES MÉTODOS LASER. AS LINHAS PARALELAS AO EIXO Y INDICAM O INÍCIO DAS COPAS DAS ÁRVORES FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).	107
FIGURA 35 - PERFIL DE CADA ÁRVORE MEDIDO PELA SUTA, FITA E MELHORES MÉTODOS LASER. AS LINHAS PARALELAS AO EIXO Y INDICAM O INÍCIO DAS COPAS DAS ÁRVORES FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).	108

FIGURA 36 - DISTRIBUIÇÃO DOS ERROS DE VOLUME PARA A TORA 1.....	113
FIGURA 37 - DISTRIBUIÇÃO DOS ERROS DE VOLUME PARA A TORA 2.....	114
FIGURA 38 - DISTRIBUIÇÃO DOS ERROS DE VOLUME PARA A TORA 3.....	115
FIGURA 39 - DISTRIBUIÇÃO DE ERROS DE VOLUME POR ÁRVORE PARA O SOMATÓRIO DAS 3 PRIMEIRAS TORAS.	117

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO DENDROMÉTRICA DAS ÁRVORES EM ESTUDO	49
TABELA 2: ESTATÍSTICAS DA POPULAÇÃO ANALISADA	77
TABELA 3 - RESULTADOS PARA ALTURA TOTAL DAS ÁRVORES.	83
TABELA 4 - ERROS ABSOLUTOS E RELATIVOS DOS MÉTODOS TESTADOS EM RELAÇÃO AO VALOR PARAMÉTRICO MEDIDO COM TRENA APÓS DERRUBADA DA ÁRVORE	84
TABELA 5 - RESULTADOS DO TESTE DE <i>TUKEY</i> A 5% PARA AS ALTURAS TOTAIS DAS ÁRVORES OBTIDAS POR DIFERENTES MÉTODOS.	86
TABELA 6 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TESTE DE <i>TUKEY</i> ($\alpha = 0,05$) PARA O BLOCO 1 ONDE ENCONTRAM-SE AS ÁRVORES DE MAIOR DIÂMETRO	89
TABELA 7 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TESTE DE <i>TUKEY</i> ($\alpha = 0,05$) PARA O BLOCO 2 ONDE ENCONTRAM-SE AS ÁRVORES DE MENOR DIÂMETRO.	89
TABELA 8: ERROS DOS MÉTODOS EM RELAÇÃO AO VALOR PARAMÉTRICO PARA FATIA 1,3 m. DADOS ORDENADOS DE FORMA ASCENDENTE SEGUINDO O MÉTODO MAL.	90
TABELA 9: ERROS DOS MÉTODOS EM RELAÇÃO AO VALOR PARAMÉTRICO PARA FATIA 2,3 m. DADOS ORDENADOS DE FORMA ASCENDENTE SEGUINDO O MÉTODO MAL.	93
TABELA 10: ERROS DOS MÉTODOS EM RELAÇÃO AO VALOR PARAMÉTRICO PARA FATIA 3,3 m. DADOS ORDENADOS DE FORMA ASCENDENTE SEGUINDO O MÉTODO MAL.	94
TABELA 11: DIÂMETROS PARA CADA UM DOS MÉTODOS. O VALOR FOTO É O VALOR DA ÁREA DA FOTOGRAFIA DIGITAL CLASSIFICADA (PARÂMETRO) CONVERTIDO EM DIÂMETRO PELA EQUAÇÃO DA CIRCUNFERÊNCIA.	97
TABELA 12: ERROS ABSOLUTOS DOS MÉTODOS <i>LASER</i> E TRADICIONAIS EM RELAÇÃO AO DIÂMETRO EXTRAÍDO DA FOTOGRAFIA DIGITAL	98
TABELA 13: ERROS EM PORCENTAGEM EM RELAÇÃO AO VALOR PARAMÉTRICO DO DIÂMETRO OBTIDO PELA FOTOGRAFIA CLASSIFICADA PARA FATIA A 1,3 M	99
TABELA 14: TESTE DE <i>TUKEY</i> PARA O BLOCO 1.	102

TABELA 15: TESTE DE <i>TUKEY</i> PARA O BLOCO 2.	103
TABELA 16: ALTURAS ABSOLUTAS E RELATIVAS DO INÍCIO DAS COPAS DAS ÁRVORES.....	103
TABELA 17: RESULTADOS DO TESTE DE <i>TUKEY</i> ($\alpha = 0,05$) PARA AS FATIAS 55% E 65%.....	104
TABELA 18: ERROS DE VOLUME POR MÉTODOS QUANDO COMPARADO COM O XILÔMETRO PARA A PRIMEIRA TORA.	110
TABELA 19: ERROS DE VOLUMES POR MÉTODOS QUANDO COMPARADO COM O XILÔMETRO PARA A SEGUNDA TORA.	111
TABELA 20: ERROS DE VOLUMES POR MÉTODOS QUANDO COMPARADO COM O XILÔMETRO PARA A TERCEIRA TORA.	112
TABELA 21 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO BLOCO 1 PARA OS VOLUMES DAS TRÊS PRIMEIRAS TORAS.....	118
TABELA 22 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO BLOCO 2 PARA OS VOLUMES DAS TRÊS PRIMEIRAS TORAS.....	118

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS QUE OPERAM POR DE TEMPO DE VÔO	21
QUADRO 2: PRINCIPAIS EQUIPAMENTO DE MUDANÇA DE FASE.....	23
QUADRO 3: COLETA DE DIÂMETROS EM CAMPO PELO MÉTODO DE HOHENALD MODIFICADO.....	51
QUADRO 4: DADOS DA RESOLUÇÃO DO <i>SCANNER</i> NO MOMENTO DAS COLETAS DOS DADOS DAS 12 ÁRVORES	54
QUADRO 5: DIVISÃO DOS BLOCOS SEGUINDO CLASSES DE DAP.....	74
QUADRO 6: FORMA DE ANÁLISE DAS FATIAS PARA O TESTE DE <i>TUKEY</i>	76

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	13
1.2 HIPÓTESES	14
1.3 OBJETIVO GERAL	14
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.5 JUSTIFICATIVAS	15
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 LUZ <i>LASER</i>	17
2.2 <i>LASER SCANNER</i> TERRESTRE	19
2.2.1 <i>Scanners</i> por tempo de vôo do sinal	20
2.2.2 <i>Scanners</i> por diferença de fase	22
2.2.3 Escolha do equipamento	23
2.3 APLICAÇÕES FLORESTAIS	23
2.3.1 Varredura simples e varredura múltipla	27
2.3.2 Identificação das árvores e filtragem dos dados <i>laser</i>	28
2.3.3 Determinação de alturas	32
2.3.4 Determinação de diâmetros	33
2.3.5 Determinação de áreas transversais	35
2.3.6 Determinação de volumes	37
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	40
3.1 OBJETO DE ESTUDO	41
3.2 EQUIPAMENTOS E <i>SOFTWARES</i> UTILIZADOS	42
3.2.1 <i>Laser Scanner</i> Terrestre	42
3.2.2 Alvos planos refletivos	43
3.2.3 Hipsômetros	44
3.2.4 Medidores de Diâmetros	45
3.2.5 Xilômetro	46

3.2.6	Software Cyclone 5.1	47
3.2.7	Software Visual Basic for Applications	47
3.2.8	Software SISVAR	48
3.2.9	Software ASSISTAT	48
3.3	PLANEJAMENTO E COLETA DE DADOS	48
3.3.1	Medidas tradicionais	50
3.3.2	Medidas paramétricas	51
3.3.3	Dados <i>laser scanner</i> terrestre	53
3.4	PROCESSAMENTO DOS DADOS TRADICIONAIS E PARAMÉTRICOS	54
3.5	PROCESSAMENTO DOS DADOS <i>LASER</i>	56
3.5.1	União das nuvens de pontos	57
3.5.2	Filtragem das nuvens	57
3.5.3	Obtenção das alturas	58
3.5.4	Obtenção de diâmetros e áreas transversais	59
3.5.4.1	Distância Máxima (DM)	60
3.5.4.2	Circunferência ótima (CO)	61
3.5.4.3	Área <i>Laser</i> (AL)	64
3.5.4.4	Área <i>Laser</i> Modificado (ALM)	66
3.5.5	Obtenção de volumes	68
3.5.6	Programa DENDROLASER	68
3.6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	69
3.6.1	Delineamentos experimentais	69
3.6.2	Teste de <i>Bartlett</i>	70
3.6.3	Teste de <i>Tukey</i>	71
3.6.4	Avaliação da filtragem	72
3.6.5	Avaliação das alturas totais	73
3.6.6	Avaliação dos diâmetros e áreas transversais	73
3.6.6.1	Comparação com valores paramétricos	74
3.6.6.2	Análise das fatias em percentuais da altura total das árvores	75

3.6.7	Análise dos volumes.....	76
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
4.1	PROGRAMA DENDROLASER.....	77
4.2	FILTRAGEM DAS ÁRVORES.....	78
4.3	OBTENÇÃO DE ALTURAS	83
4.4	OBTENÇÃO DE DIÂMETROS E SEÇÕES TRANSVERSAIS.....	87
4.4.1	Análise comparativa - valores paramétricos	87
4.4.2	Análise comparativa - métodos tradicionais.....	100
4.5	ESTIMATIVAS DE VOLUMES.....	109
5	CONCLUSÕES.....	120
6	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	123
	REFERÊNCIAS.....	124

1 INTRODUÇÃO

Atualmente ferramentas computacionais são indispensáveis, sendo cada vez mais incorporadas nos processos, independentemente da área do conhecimento. O ganho tecnológico possibilitou o desenvolvimento de *softwares* que permitem a automação de inúmeros processos como cálculos em inventários florestais, prognose do crescimento de plantações e outras aplicações, diminuindo os erros e o tempo gasto em cada atividade.

O levantamento de dados dendrométricos de árvores é base para diversos estudos e aplicações no meio florestal. Tradicionalmente os equipamentos utilizados na obtenção destes dados sofrem influência direta do operador no momento da medição, podendo ocasionar diversos erros, seja na altura obtida com hipsômetro ou no DAP obtido com fita métrica ou suta. Além disso, mensurar variáveis mais complexas, como diâmetros ao longo do tronco, por métodos tradicionais é praticamente inviável sem a derrubada da árvore (BIENERT *et al.*, 2006).

No início da década de 1960, com a aplicação da emissão de luz estimulada – conceito introduzido por Einstein em 1917 – foi descoberto o raio *laser*. As propriedades especiais desta luz, desde então, contribuem na ciência e tecnologia.

Os equipamentos *laser scanner* terrestres utilizam esta tecnologia para obter distâncias em relação aos objetos com altíssima precisão. Com as distâncias calculadas em relação ao posicionamento do equipamento, e conhecendo-se o direcionamento do feixe *laser*, é atribuída uma coordenada métrica (x, y, z) a cada ponto obtido. O resultado é uma nuvem de pontos tridimensional bastante densa podendo facilmente ultrapassar milhões de pontos com apenas alguns minutos de coleta.

O potencial de uso da varredura *laser* foi inicialmente explorado na arquitetura, mineração, geologia, engenharia civil e na indústria. Atualmente as aplicações são diversas. Na engenharia florestal, pesquisas em âmbito internacional são realizadas buscando desenvolver metodologias para extração de informações florestais (HOPKINSON *et al.*, 2004; THIES; SPIECKER, 2004; SIMONSE *et al.*, 2003). Os resultados têm demonstrado que as informações obtidas têm alta precisão quanto à geometria ao longo do tronco das árvores, permitindo não somente obter valores de alturas e diâmetros, mas avaliar, a tortuosidade, forma e qualidade da

madeira em função da inserção de galhos e danos que possam ocorrer no tronco (MAAS *et al.*, 2008).

Os grandes diferenciais desta tecnologia estão no sensoriamento remoto e na automatização dos procedimentos de obtenção e extração de informações por meio de variáveis dendrométricas. A tecnologia inibe necessidade de medições diretas (em contato com a árvore), tornando possível a obtenção de informações dendrométricas que antes eram obtidas apenas escalando, derrubando a árvore ou utilizando instrumentos ópticos. O sensoriamento remoto *laser* inibe erros comuns causados acidentalmente pelo homem no momento da coleta tradicional (medições diretas). Além disso, pode diminuir o tempo de coleta e, conseqüentemente, os custos (HOPKINSON *et al.*, 2004; THIES; SPIECKER, 2004).

Dado o elevado potencial do uso desta tecnologia para tomada de dados dendrométricos existe a necessidade de desenvolvimento e de teste de metodologias que permitam assegurar a confiabilidade dos resultados, buscando identificar os benefícios e as limitações da utilização dos equipamentos *laser scanner* terrestre. Para tal, existe a necessidade de comparar essas novas técnicas com medidas tradicionais e com parâmetros reais de altura, diâmetros, áreas de seções transversais e volumes.

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Ao se trabalhar com novas tecnologias, testes são necessários para verificar a aplicabilidade das mesmas para um dado cenário. Desta forma, este trabalho busca responder: qual a qualidade dos resultados de alturas, diâmetros, áreas transversais e volumes obtidos por varreduras simples e múltiplas utilizando a tecnologia *laser scanner* terrestre?

1.2 HIPÓTESES

As hipóteses levantadas para responder o problema de pesquisa são:

- a) Não existem diferenças significativas entre os resultados oriundos do processamento *laser* e medidas tradicionais¹ para as variáveis: Alturas totais, diâmetros, áreas transversais e volumes.
- b) Não existem diferenças significativas na mensuração de variáveis dendrométricas entre os resultados *laser* de varredura simples e múltipla.

1.3 OBJETIVO GERAL

Processar dados *laser scanner* terrestre obtidos por varredura simples e múltipla para a mensuração de árvores de *Pinus* spp.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Gerar uma metodologia para coleta de dados por meio de *laser scanner* terrestre;
- b) Filtrar dados *laser scanner* terrestre para obtenção dos pontos pertencentes ao tronco de cada árvore;
- c) Obter pelo processamento dos dados *laser* valores de alturas totais, diâmetros, áreas transversais e volumes;
- d) Comparar os resultados do processamento dos dados *laser* com os métodos tradicionais usando valores paramétricos para a análise;
- e) Analisar as diferenças nos resultados de varredura múltipla e simples.

¹ Medidas tradicionais: medidas usualmente empregadas nas coletas de dados de inventário florestal. Coletadas principalmente por suta, fita métrica e hipsômetros

- f) Criar um *software* para processamento dos dados *laser* para mensuração de árvores de *Pinus* spp.

1.5 JUSTIFICATIVAS

Os equipamentos tradicionais usados nas medições de árvores como as sutas, fitas, hipsômetros, visor de diâmetro de *Bitterlich*, entre outros, pouco têm se incorporado e integrado com a computação. Existem exceções, como algumas sutas eletrônicas ou computadorizadas, o hipsômetro *Vertex* e os coletores de dados. Ainda assim, a aplicação destes equipamentos nem sempre é possível. Por exemplo, as sutas apresentam a desvantagem de não serem indicadas para medição de parcelas permanentes de inventários florestais, limitando seu uso.

Neste contexto, os dados provenientes do *laser scanner* terrestre são bastante diferenciados tendo em vista o nível de detalhamento possível, permitindo inúmeras aplicações. Trazem uma excelente adaptação ao gerenciamento computacional, precisão de dados, rapidez na obtenção de uma grande quantidade de pontos (informações), possibilidade de georreferenciamento de todos os pontos obtidos (podendo atrelar cada árvore a um banco de dados cadastral do plantio) e principalmente pela possibilidade de cubagem indireta (eliminando custos das equipes responsáveis pela cubagem e necessidade do corte das árvores). Além disso, esses equipamentos minimizam problemas de resultados subjetivos causados pela medição de variáveis por diferentes pessoas (SIMONSE *et al.*, 2003).

Aplicações florestais para esta tecnologia poderão contribuir de forma significativa nas atividades de manejo, silvicultura e planejamento florestal, trazendo ganhos na diminuição de custos com equipes de inventário, processamento de dados e o próprio gerenciamento da produção e da floresta.

Mundialmente a pesquisa por aplicações florestais e metodologias para utilização dos *scanners* terrestres cresce rapidamente. Os principais pesquisadores deste ramo estão na Alemanha, Finlândia, Suécia, Canadá e Estados Unidos.

Em âmbito nacional, pouco se tem pesquisado quanto ao uso desta tecnologia, faltando o desenvolvimento de metodologias de coleta de dados, processamento e a criação de *softwares* específicos para aplicações florestais.

Sendo assim, trabalhos nesta temática são de extrema importância dado o andamento e as perspectivas mundiais das aplicações desta tecnologia.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este tópico apresenta a revisão de literatura pertinente ao tema de pesquisa, realizada durante o estudo. Os assuntos são organizados em temas principais em ordem lógica facilitando a compreensão geral do estado da arte.

2.1 LUZ LASER

Os estudos da propagação e da produção de luz, bem como seus mecanismos de interação com a matéria estão alocados em uma subdivisão da física, a óptica. A grande aplicabilidade da óptica na ciência se deve, bastante, ao desenvolvimento do raio *laser*. Essa fonte de luz possui características únicas que a tornam um excelente instrumento de uso científico e tecnológico (BAGNATO, 2001).

O descobrimento da luz *laser* data do início da década de 1960, sendo uma das numerosas contribuições da física quântica para a tecnologia (HALLIDAY *et al.*, 2007). O conceito que possibilitou a criação de *lasers* foi proposto por Albert Einstein, por volta de 1917, cujo estudo previa que seria possível estimular um corpo a liberar energia em forma de radiação eletromagnética com características uniformes e constantes (GONÇALES, 2007). Devido às limitações tecnológicas existentes na época de Einstein, somente a partir da década de 1950 começaram as pesquisas com esse conceito proposto.

O primeiro dispositivo construído com esses princípios funcionava na região das microondas e foi denominado Maser (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Em 1960, Theodore Maiman, conseguiu fazer funcionar um equipamento que produzia radiação estimulada na região visível do espectro eletromagnético. A esta luz foi atribuído o nome de *laser*, que é o acrônimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ou seja, amplificação da luz por emissão estimulada de radiação (BARROS, 2002).

A explicação física do processo de geração da luz *laser* é abordada pelos autores anteriormente citados e apresentada em resumo. Para entender o processo é necessário relembrar de conceitos do modelo atômico de Bohr, no qual os elétrons

giram ao redor do núcleo, podendo estar em camadas ou níveis de energia distintos, por exemplo, E0 e E1. Assim, um átomo em estado excitado E1 quando volta ao seu estado estável E0 apresenta uma perda de energia que é liberada em forma de radiação eletromagnética, ou seja, um fóton. Esse processo pode ocorrer naturalmente (sem nenhuma ajuda externa) no processo de emissão espontânea gerando uma radiação multidirecional, ou pode ocorrer por meio de um processo de emissão estimulada. Neste último, um quantum extra é absorvido por um átomo que já se encontra em seu estado excitado, ocorrendo a liberação de dois fótons quando o átomo volta a seu estado mais estável, conferindo características especiais ao feixe de luz em que, em resumo, segundo Barros (2002):

- a) a luz *laser* é monocromática, ou seja, apresenta somente um comprimento de onda;
- b) ao contrário das fontes de luz convencionais a luz *laser* pode atingir potências muito elevadas;
- c) a luz *laser* é altamente direcional. A divergência do feixe de luz *laser* é muito pequena;
- d) a luz de um *laser* é coerente. Quando dois feixes luminosos produzidos pelo mesmo *laser* são separados e recombinaos depois de viajarem grandes distâncias ainda existe uma relação entre as fases desses dois feixes.

Por fim, para que exista luz *laser*, segundo Bagnato (2001), devem estar presentes ao menos três componentes ou partes:

- a) meio ativo: parte que contém os átomos que por meio de saltos energéticos de seus elétrons geram fótons (luz) em um dado comprimento de onda;
- b) fonte externa de energia: os elétrons normalmente não se encontram na sua forma excitada necessitando de uma fonte externa de energia para que ocorra a excitação permitindo que com a emissão estimulada sejam liberados os fótons;
- c) cavidade óptica: através de espelhos faz com que os fótons que emergem do sistema voltem e produzam mais emissão estimulada.

- d) Existe apenas uma cavidade onde ocorre a liberação de um feixe *laser* para o meio externo.

2.2 LASER SCANNER TERRESTRE

Os instrumentos *laser scanner* terrestre estão se tornando uma excelente ferramenta para captura rápida e acurada de dados tridimensionais extremamente detalhados com uma ampla variedade de aplicações em florestas, mineração, transportes, planejamento urbano, entre inúmeras outras aplicações (LICHTI; PFEIFER e MAAS, 2008).

Segundo Wutke (2006), existem dois tipos de sistemas de varredura *laser*: os sistemas estáticos, em que o equipamento fica estacionado em um determinado local para coleta de dados, e os sistemas dinâmicos, em que o equipamento em movimento coleta dados. Nesta pesquisa abordam-se unicamente os sistemas de varredura estáticos.

Os equipamentos *laser scanner* terrestre são normalmente montados sobre um tripé ou plataforma estável. O pulso *laser*, em geral, se propaga horizontalmente no sentido horário deslocando-se em pequenos intervalos angulares. A cada incremento (horizontal) por meio de um telescópio ou espelho giratório, o equipamento dispara pulsos verticalmente em intervalos angulares determinados calculando as coordenadas dos pontos que refletem o sinal. Por este motivo, a precisão de cada equipamento na geração de coordenadas dos pontos depende de sua acurácia na medição de distância e ângulos (MÁRQUEZ, 2010).

Os sistemas estáticos podem ser classificados em três grupos de equipamentos *laser scanner* terrestre, de acordo com o seu princípio de funcionamento, sendo eles: tempo de voo do sinal (*Time of Flight*), diferença de fase (*Phase-difference*) e triangulação (*Triangulated Scanner*). Há pouco tempo os equipamentos mais comuns e que dominavam o mercado eram os baseados no tempo de voo do sinal. Atualmente, porém, com o rápido desenvolvimento dessa tecnologia os *scanners* por diferença de fase, com velocidade de coleta de dados extremamente rápida, mas com alcances menores, tornaram-se igualmente comuns (LICHTI; PFEIFER e MAAS, 2008).

2.2.1 Scanners por tempo de vôo do sinal

Atualmente é o princípio de medição de distância mais popular nos equipamentos *laser scanner* terrestre. Traz como vantagem a medição de distâncias superiores a 100 metros sem problemas de ambiguidade² e com uma precisão bastante razoável (FRÖHLICH; METTENLEITER, 2004).

Os equipamentos se baseiam na equação geral da velocidade, razão entre distância e tempo. Esses modelos enviam pulsos *laser* que atingem e são refletidos pelos objetos, uma vez que é conhecida a velocidade da luz, a metade do tempo que o pulso levou desde sua saída do *scanner* até seu retorno é utilizada para calcular a distância do equipamento ao objeto (MÁRQUEZ, 2010).

A FIGURA 1 demonstra como funcionam os equipamentos de tempo de vôo. O pulso é emitido pelo equipamento e o relógio contador é iniciado. Após ser refletido por um objeto, o sinal retorna para um receptor que interrompe a contagem de tempo.

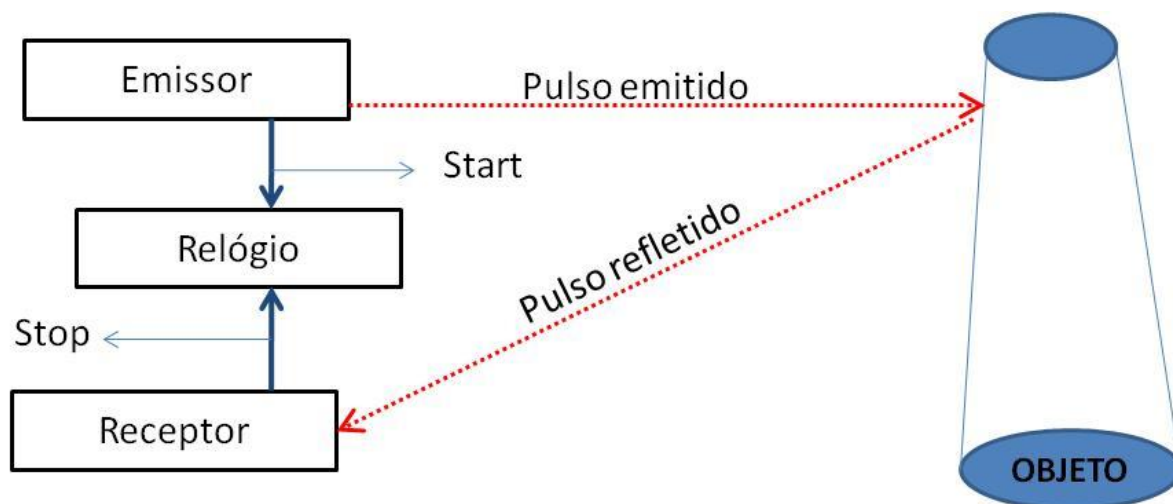


FIGURA 1 – FUNCIONAMENTO DE UM LASER TEMPO DE VÔO
FONTE: Adaptado de Márquez (2010).

Lichti, Gordon e Stewart (2002), de forma bastante simples, apresentaram a forma para o cálculo da distância do *scanner* até cada objeto refletido pelo princípio de tempo de vôo (Equação 1).

² Ambiguidade: Problema encontrado em *laser scanners* de mudança de fase. Existe uma distância de coerência de dados. A partir desta, os valores coletados resultam em distâncias erradas que confundem com a distância correta de outros objetos.

$$D = \frac{1}{2} * c * \Delta t \quad (1)$$

Onde: D é a distância do *scanner* para o objeto;

c é a velocidade da luz (300×10^3 km/s);

Δt é o tempo que o pulso leva para ir e voltar para o sensor.

Segundo Márquez (2010) a velocidade de amostragem desta tecnologia é mediana, os equipamentos mais modernos conseguem trabalhar com velocidades de até 128 KHz, ou seja, $1,28 \times 10^5$ pontos por segundo. Embora não tenham grandes velocidades, trazem como atrativo a capacidade de alcançar com boa precisão objetos a longas distâncias (até 2 km). Há pouco tempo esses equipamentos eram consideravelmente mais lentos e a duração para varredura do campo total de visão do *laser* com uma densidade de pontos razoável poderia demorar horas já que dificilmente apresentavam velocidade de coleta superior a 2000 pontos/s (FRÖHLICH; METTENLEITER, 2004).

Alguns modelos de equipamentos são apresentados por Wutke (2006), Fröhlich e Mettenleiter (2004) e Márquez (2010). Dentre as principais fabricantes de equipamentos que usam o princípio de tempo de voo do sinal pode-se citar a *Leica-Geosystems* (em conjunto com a *Cyra Technologies*), *Optech*, *Riegl Laser Measurement Systems* e outros. O QUADRO 1 apresenta os principais equipamentos desses fabricantes que operam pelo princípio de tempo de voo.

Fabricante	Modelo	Alcance (m)	Velocidade (Max) (Pontos/sec)	Fonte
Optech	ILRIS-3D	1200	3.500	www.optech.ca
	ILRIS-3D-ER	1700	3.500	
	ILRIS-HD	1250	10.000	
	ILRIS-HD-ER	1800	10.000	
	ILRIS-LR	3000	10.000	
Leica-Geosystems /	HDS-8800	2000	8.800	www.leica-geosystems.com
	C-10	300	50.000	
Cyra Technologies	HDS-3000	100	1.800	
	ScanStation2	300	50.000	
Riegl	LMS-Z390i	400	11.000	www.riegl.com
	LMS-Z420i	1000	11.000	
	LMS-Z620	2000	11.000	
	Riegl VZ-1000	1400	122.000	
	Riegl VZ-400	600	122.000	
	LPM-321	6000	1.000	

QUADRO 1: PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS QUE OPERAM POR DE TEMPO DE VÔO
FONTE: O Autor (2011).

2.2.2 *Scanners* por diferença de fase

O método de diferença de fase é também denominado de AMCW (*Amplitude Modulated Continuous Wave*) (MÁRQUEZ, 2010; FRÖHLICH; METTENLEITER, 2004). Assim como os *scanners* por tempo de voo, os equipamentos que utilizam o princípio AMCW são comuns. No entanto, seu intervalo é restrito ao máximo de 100 metros com precisão de medidas de distância de alguns milímetros (FRÖHLICH; METTENLEITER, 2004).

Segundo os mesmos autores, estes *scanners* estão no mercado há mais de 10 anos. Oferecem altas taxas de amostragem e trazem como principal desvantagem o fato de possuírem uma faixa restrita de dados sem ambigüidades.

Para entender a desvantagem oriunda da ambigüidade dos dados é necessário abordar alguns conceitos técnicos deste princípio de medição.

Duas ondas das quais são conhecidos os comprimentos de onda e as proporções entre os ciclos são emitidas pelo equipamento, por exemplo, onda 1 com 40 metros, e onda 2 com 50 metros, a proporção entre as duas ondas origina o ponto onde ambas irão se encontrar pela primeira vez. Em outras palavras, o encontro ocorrerá quando 5 ciclos da onda 1 e 4 ciclos da onda 2 estiverem completados, ou seja, a uma distância de 200 metros. Sabendo desta interação, é possível calcular a distância conhecendo somente as diferenças de fase entre a onda 1 e 2 (ANTUNES, 1995):

Para este exemplo citado anteriormente, como o cálculo é realizado somente utilizando a diferença entre as fases das ondas, os pontos que estiverem a uma distância superior aos 200 metros, neste exemplo, começam a apresentar problema de ambigüidade, ou seja, um ponto que está distante a 201 metros irá aparecer como se estivesse a 1 metro de distância do *laser*.

Alguns modelos de equipamentos são apresentados por Wutke (2006), Fröhlich e Mettenleiter (2004) e Márquez (2010) e em alguns artigos científicos aplicados à engenharia florestal, como é o caso de Simonse *et al.* (2003). Os principais fabricantes de equipamentos que usam o princípio de diferença de fase são a *Leica-Geosystems* (em conjunto com a *Cyra Technologies*), *Faro* e *Zoller + Fröhlich* e alguns de seus equipamentos são apresentados na QUADRO 2:

Fabricante	Modelo	Intervalo de Ambiguidade (m)	Velocidade (Pontos/seg)	Fonte
Leica-Geosystems/	HDS-6100	79	508.000	www.leica-geosystems.com
	HDS-6200	79	1.016.727	
Cyra technologies	HDS-4500	25	500.000	
	HDS-4500	53	500.000	
FARO	Photon 120/20	120	976.000	www.faro.com
Zoller + Fröhlich	IMAGER 5003	79	1.016.727	www.zf-laser.com
	IMAGER 5006EX	79	508.000	
	IMAGER 5006H	79	1.016.727	
	IMAGER 5010	187,3	1.016.000	

QUADRO 2: PRINCIPAIS EQUIPAMENTO DE MUDANÇA DE FASE

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

2.2.3 Escolha do equipamento

Alguns *scanners* são fabricados para usos internos com alcance máximo de 100 metros, outros para uso externo com alcance superior a 100 metros, e alguns têm um alcance curto, não ultrapassando poucos metros, porém com altíssima precisão (FRÖHLICH; METTENLEITER, 2004).

A opção por um equipamento deve ser feita avaliando a aplicação principal que será dada. Segundo Márquez (2010), para levantamentos a curtas distâncias que necessitem de uma alta densidade de pontos coletados, seria mais indicado um equipamento com tecnologia de mudança de fase. Já no caso de levantamento de objetos que estão a grandes distâncias, um equipamento com sistema de tempo de voo tem as características certas para estas aplicações.

2.3 APLICAÇÕES FLORESTAIS

Atualmente há uma exigência crescente de obtenção de dados de alta precisão, rapidez na coleta e que possam ser reproduzidos de forma eficiente (THIES; SPIECKER, 2004).

Os sistemas *laser* surgiram como ferramenta para o mapeamento e aplicações na área florestal nos anos 1980, com os equipamentos aerotransportados

(ZANDONÁ, 2006), permitindo a obtenção de informações tridimensionais da superfície terrestre com alta precisão (POPESCU, 2002). Houve um desenvolvimento notável desde os anos 1980 até o presente no que se refere às aplicações de *laser scanner* aerotransportado no meio florestal. Inicialmente as pesquisas buscaram determinar a biomassa usando a variável altura total obtida pela varredura *laser* como variável independente em modelos de regressão (NELSON, KRABILL E TONELLI, 1988; DRAKE *et al.*, 2002; MEANS *et al.*, 1999 E LEFSKY, 1999a citados por ZANDONÁ, 2006). Os modelos foram evoluindo e passaram a ter, além da altura total das árvores, o diâmetro de copas ou área das copas buscando melhorias na acurácia dos inventários florestais com *laser scanner* aerotransportado como foi abordado nas pesquisas de Spencer B. Gross INC (1999) e Friedlaender e Koch (2000) citados por Zandoná (2006). Embora haja um grande desenvolvimento na pesquisa com *laser scanner* aerotransportado para aplicações florestais existem limitações na obtenção direta de variáveis como DAP e diâmetros ao longo dos fustes.

Neste contexto, com os avanços tecnológicos nos sistemas *laser scanner* terrestre (LICHTI *et al.*, 2000; LICHTI, GORDON e STEWARD, 2002; LICHTI, PFEIFER e MAAS, 2008) o potencial do uso desta tecnologia para a mensuração florestal têm se tornado evidente (HOPKINSON *et al.*, 2004), sendo um meio de coleta de dados métricos eficiente e rápido (LIANG *et al.*, 2008) aumentando as possibilidades de mensuração (KIRÁLY; BROLLY, 2010) em função do alto nível de detalhamento dos dados (BUCKSCH *et al.*, 2010). A tecnologia permite a obtenção de dados tridimensionais acerca dos alvos gerando informações com alta precisão sobre a geometria ao longo do tronco da árvore (MAAS *et al.*, 2008).

Algumas pesquisas têm apontado resultados com acurácia na obtenção de parâmetros tradicionalmente coletados como DAP e altura com a tecnologia *laser scanner* terrestre. Além disso, novos parâmetros, que antes eram inviáveis, podem ser obtidos utilizando esta tecnologia (KIRÁLY; BROLLY, 2010).

Inúmeras possibilidades de aplicação desta tecnologia foram publicadas na última década. Loudermilk *et al.* (2007) avaliaram a aplicabilidade de *scanner* terrestre móvel para avaliação da quantidade de material combustível acumulada da superfície do solo. Krooks *et al.* (2010) afirmaram ser um ferramental com elevado potencial para determinação de biomassa florestal e abordam o uso da tecnologia para detecção de mudanças na biomassa em vegetação de árvores caducifólias.

Van der Zande *et al.* (2010) analisaram o uso de *scanner* terrestre para descrever mudanças na entrada de luz na vegetação em diferentes momentos na estação de crescimento de árvores de Oak (*Quercus robur* L.). Puttonen *et al.* (2010) aplicaram a tecnologia *laser* terrestre para obtenção da área de copa de árvores individuais. Parker, Harding, Berger *et al.* (2004) aplicaram-na para determinar a estrutura do dossel em florestas.

Outros aspectos relativos à floresta podem ser derivados dos dados *laser* terrestre, como a tortuosidade do fuste, a inserção e o número de galhos, características que indicam a qualidade da madeira (SCHÜTT *et al.*, 2004), estimativas de biomassa de acículas buscando determinar danos causados por pragas e doenças (SEIFERT; SEIFERT, 2006), medição da abertura do dossel podendo avaliar a competição de copas (DANSON *et al.*, 2008).

Gorte e Winterhalder (2004), usando operações de filtragem no domínio 3D raster, relataram a possibilidade de criação de um algoritmo para a individualização das copas das árvores.

No Brasil, a Universidade Federal do Paraná apresenta-se como pioneira nos estudos com essa tecnologia no meio florestal. As pesquisas com *Pinus spp* tem abordado as perspectivas de uso do *laser scanner* terrestre, os procedimentos de isolamento e filtragem dos dados, a mensuração de alturas individuais de povoamentos e a comparação entre os diâmetros medidos pelo *laser* com diâmetros da cubagem tradicional (LINGNAU *et al.*, 2007; LINGNAU *et al.*, 2008; LINGNAU *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2011).

Há pouco tempo, a tecnologia *laser* na estimativa de biomassa foi pesquisada com uso de equipamentos *laser* aerotransportados, como por exemplo, o trabalho de Popescu (2007). A obtenção de biomassa de árvores individuais medidas por *laser scanner* terrestre tornou-se uma ferramenta valiosa para valorar econômica e ecologicamente a floresta (BUCKSCH *et al.*, 2010). Esses autores, medindo biomassa com *scanner* e com métodos tradicionais, chegaram a resultados com uma diferença média em relação ao método tradicional de 1,18 dm³ (litros).

Alguns autores como Pfeifer, Gorte e Winterhalder (2004), Xu *et al.* (2007) e Bucksch *et al.* (2010) apresentaram metodologias para identificação da arquitetura da árvore, ou seja, além da preocupação com o tronco aplicaram um método chamado “*Skeletonization*” (Esqueleto da árvore), em que se encontram o fuste e galhos. Dentre as dificuldades encontradas Pfeifer, Gorte e Winterhalder (2004)

relataram problemas em reconstruir os galhos das partes superiores das árvores em função da copa.

Côté, Fournier e Egli (2011), trabalhando com a modelagem da arquitetura das árvores, ressaltaram que a nuvem de pontos *laser scanner* terrestre gera uma visualização da estrutura do dossel em 3D, mas não provê informações específicas a respeito da mesma. É necessário, portanto, um meio para sintetizar e quantificar as informações espaciais. A qualidade da coleta de dados e o tipo de vegetação influem diretamente nos resultados da modelagem. Existe maior dificuldade em se obter a arquitetura precisa de árvores não caducifólias. Um dos objetivos de se utilizar a tecnologia *laser* para este tipo de estudo está na capacidade de se obter medidas sem a utilização de métodos destrutivos. Esses autores criaram um programa chamado *L-Architect (Lidar data to tree Architecture)* com objetivos de obter a arquitetura das árvores automaticamente, estudar os efeitos de oclusão do tronco pela copa e do vento no momento da coleta de dados sob os resultados da modelagem, diferenciar madeira dos elementos da folhagem. O programa *L-Architect* reconstrói a arquitetura das árvores por meio de três procedimentos:

- 1- construção de um esqueleto inicial composto pelo tronco e galhos principais;
- 2- reconstrução dos galhos mais finos e;
- 3- adição da folhagem.

No passo 1 são selecionados os pontos baseando-se em suas intensidades. A folhagem apresentará um valor de intensidade inferior ao tronco dadas as propriedades espectrais desses materiais. Assim, colocam-se dois limiares de intensidade. Se a intensidade é maior que um determinado valor é madeira. Se é menor que um determinado limiar é folhagem e se o ponto está entre os limiares é inicialmente ignorado.

O processamento dos dados *laser*, porém, ainda é uma atividade difícil. Nas aplicações florestais a oclusão dos objetos (efeito sombra), os ventos e a umidade no momento da coleta têm se tornado um problema (CÔTÉ; FOURNIER; EGLI, 2011) visto que a qualidade dos futuros resultados está atrelada aos parâmetros definidos no *scanner* e a qualidade final dos dados brutos.

2.3.1 Varredura simples e varredura múltipla

Na varredura por *laser scanner* terrestre (LST) a tomada de dados pode ser realizada somente de um ou de múltiplos pontos de instalação do *laser* para coleta de dados do(s) objeto(s) de uma cena (FIGURA 2). Quando o equipamento é instalado em somente um ponto de posicionamento chama-se essa metodologia de coleta de varredura simples (FIGURA 2 A ou B). Neste caso, o conjunto de dados recobre parcialmente o fuste das árvores com pontos *laser*. Já quando o equipamento é posicionado em vários pontos e essa nuvem de pontos é unida em um mesmo sistema referencial, a metodologia é denominada coleta de varredura múltipla o que gera dados semelhantes aos apresentados na FIGURA 2 quando a coleta A foi unificada com a coleta B em um mesmo sistema referencial. Este método pode recobrir os objetos, em sua totalidade, com pontos *laser*. No caso de árvores, portanto, tem-se um recobrimento do fuste completo conferindo uma maior qualidade de dados e, conseqüentemente, de resultados (THIES; SPIECKER, 2004).

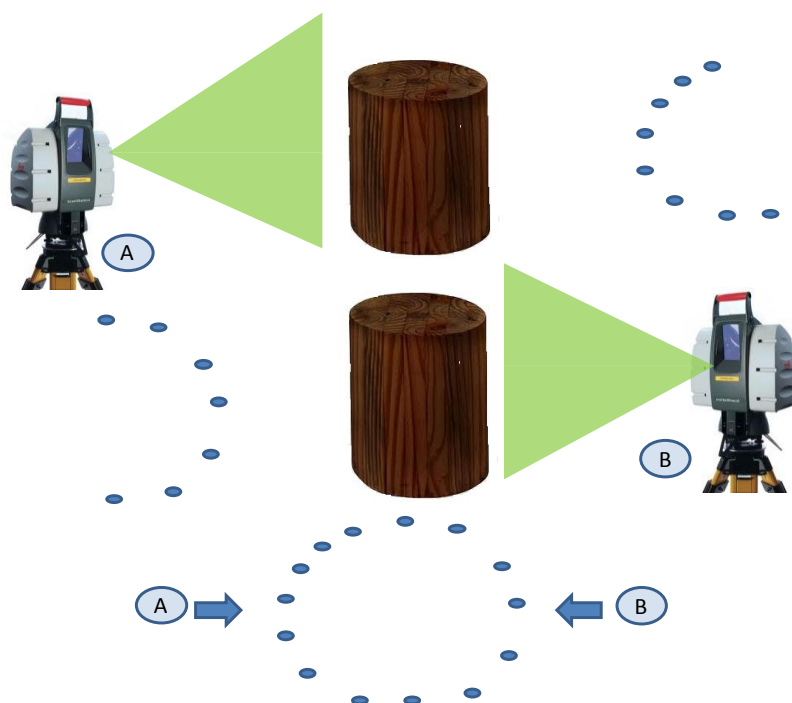


FIGURA 2 - VARREDURA *LASER SCANNER*. A UNIÃO DE DUAS VARREDURAS SIMPLES (A E B) ORIGINA DADOS DE VARREDURRA MULTIPLA.
FONTE: Elaborado pelo Autor (2011)

A tomada de dados por varredura simples gera arquivos menores sendo a coleta e o processamento de dados mais rápido que em varreduras múltiplas (LITKEY *et al.*, 2008). Além da maior densidade de pontos em varreduras múltiplas existe, em geral, a exigência da instalação de alvos que possam ser visualizados pelos distintos pontos de instalação do equipamento permitindo o posterior agrupamento do conjunto de dados em um mesmo sistema de coordenadas (BIENERT *et al.*, 2006).

Nas varreduras múltiplas o equipamento costuma ser instalado em vários pontos fora da parcela de amostragem buscando recobri-la pela nuvem de pontos. Já na varredura simples a amostragem é feita de um único ponto central da parcela amostrada. Geralmente, a nuvem de pontos de varreduras múltiplas proporciona uma maior continuidade de pontos e maior acurácia. Porém, reflete em um maior tempo de coleta de dados e consequentemente um maior custo. No caso da varredura simples, na melhor das hipóteses metade da árvore será recoberta por pontos *laser* ficando o restante sem informações. Desta forma, a inclusão de pontos não pertencentes ao tronco ocorre mais facilmente tornando o ajuste menos preciso (LIANG *et al.*, 2008).

Em varreduras múltiplas a complexidade para o pré-processamento dos dados é maior, no entanto, as adversidades e as oclusões (efeito sombra) são reduzidas.

2.3.2 Identificação das árvores e filtragem dos dados *laser*

Na análise das informações contidas na nuvem de pontos, um dos primeiros procedimentos é detectar o objeto de interesse e seu respectivo posicionamento (ASCHOFF; SPIECKER, 2004). Existem várias formas propostas na literatura, as quais podem ser consideradas automáticas, semi-automáticas ou manuais.

No caso florestal, processos automáticos de localização de árvores são importantes (ASCHOFF; THIES; SPIECKER, 2004). Um dos métodos mais aplicados para este fim tem sido a transformação "*Hough*" que identifica a tendência do fuste em formar circunferências (SIMONSE *et al.*, 2003; ASCHOFF; THIES; SPIECKER, 2004; BIENERT *et al.*, 2007). A aplicação da transformação "*Hough*" é

feita realizando cortes a determinada(s) altura(s) do solo com uma pequena espessura, por exemplo, um corte a 1,3 m do solo com uma espessura de 10 cm (1,25 a 1,35). A visualização da imagem proporcionada por este corte permite identificar que no local das árvores aparecerão as seções transversais do tronco a 1,3 m. No caso de varreduras múltiplas aparecerão desenhos parecidos com circunferências e em varreduras simples com semicircunferências. Os algoritmos da transformação de “*Hough*” buscam nesta imagem a posição onde estão localizadas essas circunferências ou semi-circunferências. Com essa posição encontra-se a coordenada de centro de cada árvore.

Existem outras formas de identificação automática como a proposta por Bienert *et al.* (2007). O procedimento é mais simples que a aplicação da transformação de “*Hough*”, envolvendo algoritmos menos complexos. O método analisa os pontos em uma dada altura, por exemplo, 1,3 m. O espaço total é dividido por uma malha, na qual em cada célula são somados o número de pontos encontrados. O tamanho desta malha é definido em função dos parâmetros de resolução usados no momento da coleta de dados com o *laser*, ou seja, quanto menor a resolução, maior será o tamanho da malha. Bienert *et al.* (2007) selecionaram um tamanho de célula de 4 cm. No momento da varredura, com base nos parâmetros do *scanner*, é possível prever quantos pontos devem retornar por célula quando se atinge um objeto. Com esse valor, e descontando uma margem de 30%, os autores definiram como limiar de que cada célula, para ser parte de uma árvore, deveria ter pelo menos 13 pontos. As células que têm um valor igual ou superior a 13 são separadas e avaliadas com suas vizinhas para então definir se realmente se trata de uma árvore. A FIGURA 3 demonstra um corte realizado a 1,3 m de altura a partir do Modelo Digital do Terreno (MDT). Em “A” tem-se a nuvem de pontos em duas dimensões plotadas sob uma malha. Em “B” cada ponto foi contabilizado em sua respectiva célula. E por fim, em “C” são identificadas e agrupadas as células que compõem a árvore.

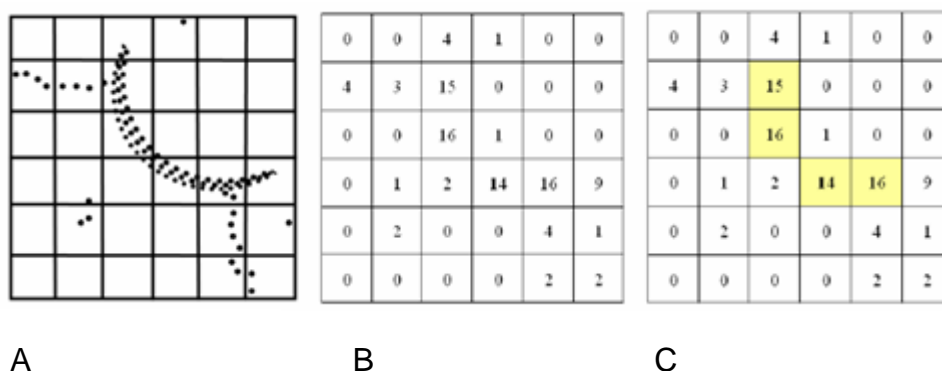


FIGURA 3 – METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO DE ÁRVORES
 FONTE: Bienert *et al.* (2007).

A detecção do posicionamento da árvore apresenta alta acuracidade quando obtida pelo *laser* (THIES; SPIECKER, 2004) em alguns casos 95% das árvores testadas foram identificadas corretamente (BIENERT; MAAS; SCHELLER, 2006). Em varreduras simples onde algumas árvores ficam escondidas atrás de outras (efeito sombra) a identificação fica comprometida e, neste caso, cerca de 85% das árvores foram identificadas corretamente. Para distâncias mais curtas (até 15 m) a detecção automática identifica corretamente 100% das árvores para as condições da floresta estudada por Litkey *et al.* (2008). Segundo os mesmos autores, o posicionamento e o campo visual do ponto de instalação do equipamento são fundamentais para a identificação e a modelagem do tronco com sucesso.

Simonse *et al.* (2003), usando transformação de “*Hough*”, identificaram corretamente 26 árvores de um total de 28 tendo como medida de referência os dados obtidos por uma estação total. As duas árvores que não foram identificadas estavam encobertas por pequenos galhos que atrapalhavam a visada do *scanner*. Esses autores consideraram o uso deste método como promissor visto os resultados que foram obtidos.

Avaliando uma metodologia de detecção e modelagem automática e manual de árvores Liang *et al.* (2008) encontraram que para distância de até 10 metros do *scanner* todas as árvores foram identificadas corretamente pelo método automatizado. A partir dos 10 metros até os 60 metros, dividindo os resultados em classes de 10 m de amplitude, cerca de 70% das árvores foram encontradas automaticamente sendo a detecção manual considerada como parâmetro de comparação.

Para fins de inventário florestal é importante, por motivos de tempo de processamento, a identificação automática de árvores. No entanto, nada impede que a identificação e isolamento sejam realizados manualmente, por meio de *softwares* de visualização da nuvem de pontos, principalmente quando se trabalha com indivíduos e não com parcelas (LINGNAU *et al.*, 2008; LINGNAU *et al.*, 2009).

A filtragem de pontos consiste em eliminar os pontos que não pertencem ao(s) objeto(s) de interesse. A nuvem de pontos de uma árvore contém galhos, pontos do solo, vegetação adjacente e sub-bosque; esses pontos devem ser eliminados antes da modelagem dos fustes (LITKEY *et al.*, 2008; LIANG *et al.*, 2008). Segundo os mesmos autores, utilizando um equipamento de alta velocidade de aquisição de dados ($1,2 \times 10^5$ pontos/sec), só é possível aplicar filtros e modelar árvores que estejam a um limite máximo entre os 50 a 60 metros de distância do *laser*.

A filtragem também busca eliminar problemas de natureza técnica como, por exemplo, os pontos *laser* das bordas dos objetos. Nesses limites pode ocorrer que o sinal *laser* retorne, não somente, o valor do objeto de interesse, e sim um valor entre este e o objeto ao fundo medido por parte do raio *laser* (ASCHOFF; THIES; SPIECKER, 2004).

Pontos isolados também são considerados como ruídos e, portanto, deve-se fazer uma avaliação de distância em relação aos seus vizinhos mais próximos e filtrá-los do arquivo da nuvem de pontos.

Alguns filtros são descritos na literatura. Um filtro indicado para equipamento com princípio de medição por diferença de fase é o de intensidade, valores muito altos e muito baixos costumam não fazer parte dos alvos de interesse e devem ser eliminados (SIMONSE *et al.*, 2003; ASCHOFF; THIES; SPIECKER, 2004). Além disso, pontos fora do intervalo de medição (pontos ambíguos) apresentam intensidade de retorno menor que os pontos do intervalo de coerência (ASCHOFF; THIES; SPIECKER, 2004).

Bienert *et al.* (2006) descreveram um filtro baseado na distância máxima que os pontos podem estar do(s) objeto(s) de interesse e, para tal utiliza um cilindro cujo raio é a distância máxima permissível em relação ao objeto, eliminando os pontos que excedem esse limite. Litkey *et al.* (2008) descreveram um filtro que se baseia no ajuste de uma linha aos pontos. Os pontos que desviam dessa tendência linear são filtrados eliminando assim pontos de galhos. Além desse procedimento, os pontos

que estão a mais de dois desvios padrões em relação ao ajuste desta reta são eliminados.

A eliminação de galhos, folhas e outros objetos esparsos na nuvem de pontos podem ser excluídos utilizando estatística multivariada (LALONDE; VANDAPEL; HEBERT., 2006). Por meio dos autovalores e autovetores é feita uma classificação dos pontos da seguinte forma: Pontos de estrutura randômica, pontos de estrutura linear (pertencentes a galhos) e por fim, pontos com estrutura de superfície (tronco da árvore).

2.3.3 Determinação de alturas

A obtenção de um MDT permite que camadas horizontais de diferentes alturas do solo possam ser extraídas. Estas camadas, quando representadas a 1,30 m do solo, permitem a localização individual das árvores com maior certeza, pois se trata da altura em que é medido o DAP (ASCHOFF; SPIECKER, 2004; ASCHOFF; THIES; SPIECKER, 2004). O MDT possibilita encontrar o ponto mais baixo de cada árvore, a partir do qual são recalculados os demais pontos obtendo as alturas totais e parciais ao longo do fuste, imprescindíveis para determinação de diâmetros a diferentes alturas utilizados em cálculo de volume (BIENERT *et al.*, 2006). Outra possibilidade para determinar a base de cada árvore é através da determinação dos pontos mais baixos em um raio de 1 metro da árvore detectada (LITKEY *et al.*, 2008).

Após todos os processos de criação de modelo digital do terreno, identificação de árvores e aplicação de filtros, pode-se realizar a determinação das alturas: total e parciais de cada árvore. Na comparação dos resultados *laser* com dados de inventário, Wezyk *et al.* (2007) registraram erros médios em valores absolutos para povoamentos com Oak e Beach de 1,10 metros, já para povoamento de coníferas o valor foi de 0,79 metros.

A altura total de árvores também foi estudada por Bienert *et al.* (2006). No entanto, somente duas árvores tinham suas medidas de altura, as demais, foram

estimadas por equações hipsométricas³. Os resultados foram diferenças de 0,22 e 1,47 metros para essas duas árvores. Cabe ressaltar que as alturas foram determinadas por hipsômetro, fato que causa incertezas sobre a confiabilidade dos resultados. Em outra unidade amostral o erro médio quadrático foi de 80 cm. Hopkinson *et al.* (2004) também basearam a comparação das alturas *laser* com dados de hipsômetro, e seus resultados apresentaram uma diferença média subestimando em 1,5 metros.

Király e Brolly (2007) calcularam a altura baseando-se não somente no MDT. O algoritmo elaborado utiliza também o modelo do fuste para encontrar o topo de cada árvore. Esses autores relatam que o processo foi capaz de descrever mais de 95% dos casos.

Embora o MDT facilite a automatização dos procedimentos, é possível a medição de alturas sem o seu uso diminuindo a complexidade dos algoritmos. Resultados com precisão compatível foram apresentados por Lingnau *et al.* (2009) e Silva *et al.* (2011).

2.3.4 Determinação de diâmetros

A obtenção de diâmetros, principalmente o DAP, é essencial no estudo de crescimento de povoamentos florestais e na determinação do estoque de madeira existente. Muitos métodos de processamento *laser* com foco nesta variável têm sido desenvolvidos sendo alguns deles relatados a seguir.

Uma solução é o ajuste de circunferências nos pontos em cada altura que se deseja determinar o diâmetro, para tal o método de ajuste por mínimos quadrados pode ser utilizado (LIANG *et al.*, 2008; BIENERT *et al.*, 2006, BIENERT *et al.* 2007; LITKEY *et al.*, 2008; ASCHOFF; THIES; SPIECKER, 2004). Esse procedimento visa encontrar um centro e raio da circunferência que melhor se ajusta ao conjunto de pontos obtidos pela varredura *laser*. Em outras palavras, minimizando o quadrado das distâncias entre os pontos *laser* e uma circunferência, é possível encontrar o melhor centro para a circunferência, bem como o seu raio. A distância média entre o

³ Equações hipsométricas: São funções ajustadas que estimam a altura de árvores com base no DAP (Diâmetro a altura do peito).

centro calculado e os pontos *laser* é considerada como raio. A aplicação desta metodologia pode ser feita tanto em varredura simples quanto em varredura múltipla. Os resultados do ajuste, no entanto, são mais realistas quando os dados utilizados são oriundos de varredura múltipla. Segundo Henning e Radtke (2006), utilizando este método nos casos em que existem pontos de galhos ou copa pode-se superestimar os diâmetros. Já em casos onde parte do tronco foi ocultado por outros objetos, pode haver subestimação.

A modelagem do tronco pode ser obtida por meio da utilização de funções *spline* (PFEIFER; WINTERHALDER, 2004). As funções são bastante flexíveis, os polinômios ajustados vão se modelando muito bem onde existem pontos *laser*. Porém, as partes não recobertas pela nuvem de pontos, principalmente em varreduras simples, não são bem representadas por essas funções. O valor de diâmetro é obtido por meio da determinação do diâmetro da circunferência que representa a área transversal igual à obtida pela função *spline*.

Outro método bastante simples e eficiente foi apresentado por Lingnau *et al.* (2009 e 2010). Consiste na determinação de coordenadas X_{\min} , X_{\max} , Y_{\min} , Y_{\max} , correspondentes a mínimos e máximos de abcissas e ordenadas, respectivamente. Os dois pontos relativos à maior distância entre X_{\min} e X_{\max} , ou Y_{\min} e Y_{\max} são tomados inicialmente como prováveis pontos pertencentes ao diâmetro da seção considerada. Denominando tais pontos de 1 e 2, o diâmetro seria a distância planimétrica (XY) do ponto 1 ao ponto 2. O segundo passo do algoritmo é certificar se esses pontos são realmente os mais distantes. Para tal, avalia-se a distância de todos os pontos da seção analisada a estes dois pontos, substituindo um deles cada vez que se encontre distâncias maiores que a distância do ponto 1 ao ponto 2. Ao final do algoritmo têm-se o diâmetro da seção.

Lalonde, Vandapel, Hebert (2006) aplicaram duas técnicas para obtenção de diâmetros, sendo uma delas o ajuste de circunferências e posteriormente cilindros em projeção bidimensional e a segunda técnica o ajuste tridimensional desses cilindros.

A transformação de “*Hough*”, exposta anteriormente no tópico identificação de árvores, também pode ser usada para determinação de diâmetros por meio do cálculo da área das circunferências encontradas. Simonse *et al.* (2003), aplicando essa metodologia em povoamentos de *Douglas* e *Silver Fir*, encontraram um erro

médio quando comparado com medidas de suta de 1,7 cm com um desvio padrão de 2,8 cm.

Independente das metodologias utilizadas, os resultados têm indicado que há uma correspondência entre as estimativas tradicionais e as do *laser* para essa variável.

Para o DAP, Hopkinson *et al.* (2004) em povoamentos de *Pinus resinosa* e *Acer saccharum* verificaram uma boa relação com a medida tradicional expressa por um coeficiente de determinação alto ($R^2=0,85$). Já no trabalho de Wezyk *et al.* (2007) em povoamentos de coníferas e de Beech e Oak, o ajuste foi ainda melhor alcançando um R^2 de 0,94 quando comparados com resultados tradicionais.

Outros resultados interessantes foram apresentados por Bienert, Maas e Scheller (2006) em florestas mistas, os diâmetros tiveram uma média de erro de 1,5 cm em relação às medições tradicionais. Thies e Spiecker (2004) em povoamentos mistos de Beech, Oak e Silver-Fir relatam medidas do DAP com desvio padrão de 1,3% em relação aos dados tradicionais quando aplicaram a metodologia proposta por Simonse *et al.* (2003).

Na comparação de medições de varredura simples em relação às medidas da suta, Litkey *et al.* (2008) em povoamento de *Pinus spp* na Finlândia encontraram um erro médio quadrático de 3 cm. Usando outra metodologia, aplicada em povoamentos de floresta mista, erros médios em relação à suta variaram entre + 0,93 e - 0,96 cm e o maior desvio padrão encontrado entre a medida *laser* e a suta foi 2,47 cm (BIENERT *et al.*, 2006).

Na medição de diâmetros dificuldades podem ser encontradas para determinar as medidas na parte superior das árvores em função de suas copas (GATZIOLIS *et al.*, 2010). Por este motivo sugerem a interpolação para recuperação estimada dos diâmetros que não podem ser medidos.

2.3.5 Determinação de áreas transversais

A obtenção das áreas das seções transversais ao longo do fuste pode ser realizada de várias formas. Algumas alternativas existentes podem ser aplicadas para modelagem das seções transversais. A circunferência tem sido o modelo mais

utilizado; a elipse também é comum, porém agrega pouca precisão em relação a circunferência (KIRÁLY; BROLLY, 2010). O grande problema dessas duas aplicações está em considerar que a seção transversal de uma árvore possui uma forma predefinida, seja uma circunferência ou uma elipse.

Métodos tradicionais permitem somente a medição de diâmetros ou de perímetros em uma dada seção. O cálculo da área transversal é então realizado aplicando fórmulas de figuras geométricas conhecidas (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006). A tecnologia *laser* permite uma grande aproximação da área transversal real das seções, seja usando *splines*, ou simplesmente utilizando todos os pontos *laser* de uma dada seção construindo polígonos de formas livres que representam com maior fidelidade a área das seções (KIRÁLY; BROLLY, 2010).

Este modelo proposto determina um centro e um limiar (raio) de busca por pontos *laser* a partir deste centro para uma dada direção. Alterando os azimutes de forma crescente no sentido horário ou anti-horário são escolhidos pontos *laser* que representam a seção transversal, os quais são utilizados para calcular a área.

Um estudo realizado por Király e Brolly (2010) tratou a questão da determinação da área transversal por 4 diferentes métodos: “*Crescent moon*”, Polígonos de forma livre (*Free Form Polygon – FFP*), ajuste de circunferência por mínimos quadrados e ajuste de cilindro por mínimos quadrados. O estudo apontou não existir diferenças significativas entre as estimativas obtidas pelos diferentes métodos, porém, os autores ressaltam que os polígonos de forma livre retratam de forma mais perfeita a área da seção transversal. No trabalho, os autores utilizaram a área do polígono de forma livre como parâmetro de comparação, ao invés, da área real medida por equipamento adequado.

O método “*Crescent moon*” descrito por Kiraly e Brolly (2007) consiste em ajustar círculos em fatias de dados *laser* ao longo do tronco utilizando três pontos cardeais em relação ao centróide do cluster. O método encontra problemas para realizar o ajuste na copa das árvores, sendo necessária a realização de estimativas pelo ajuste de regressão iterativo, onde o objetivo é a filtragem de pontos considerados como *outliers*, resultando em um modelo composto por circunferências ajustadas ao longo do tronco.

O método de polígono de forma livre (FFP) consiste em selecionar pontos localizados a partir de uma distância e azimuth do centro otimizado para uma fatia de pontos do tronco da árvore, uma média entre os pontos selecionados é realizada

e a distância radial é então recalculada para o delineamento da seção transversal onde a área pode ser obtida pelo emprego do método de Gauss.

O método de ajuste de circunferência por mínimos quadrados consiste em encontrar o melhor centro ajustável ao conjunto de pontos *laser* para uma dada espessura de fatia.

Finalmente, o último método proposto por esses autores aplica mínimos quadrados para ajustar um cilindro para um conjunto de pontos com uma espessura de 1 metro. A partir deste cilindro é derivada a área transversal.

Ao extrair fatias dos dados *laser* para medição de áreas transversais é importante levar em consideração a espessura dos cortes. Na parte inferior do tronco, onde não existem galhos, a densidade de pontos do fuste é bastante alta, assim, a espessura de corte pode ser pequena. Porém quanto mais alta é a seção, maior deve ser sua espessura para compensar os efeitos da copa e da menor amostragem do tronco por pontos *laser*.

2.3.6 Determinação de volumes

As estimativas de volumes individuais de árvores são muito importantes nos sistemas de inventário florestal. Normalmente os volumes são estimados para uma espécie ou grupo de espécies usando equações que geralmente contêm as variáveis independentes DAP e altura (GATZIOLIS *et al.*, 2010).

O modelo tradicional para o ajuste de equações de volume envolve métodos de amostragem destrutivos. Com a árvore derrubada são medidos diâmetros a pequenos intervalos proporcionando o desenvolvimento de equações de volume ou funções de afilamento (GATZIOLIS *et al.* 2010). Sendo assim, a modelagem é essencial para definir o volume de troncos e requer medições verticais e horizontais de alguns parâmetros das árvores como, diâmetros, áreas transversais e alturas (KIRÁLY; BROLLY, 2010).

Um grande problema relacionado às medidas tradicionais diz respeito às leis ambientais regionais (GATZIOLIS *et al.* 2010), ou ainda, a população pode ser pequena demais e uma amostra destrutiva poderia não ser representativa ou causar grande impacto sobre esta população. Neste caso métodos não destrutivos podem

ser utilizados. Nestas situações o *laser scanner* terrestre é uma ferramenta importante.

Em varreduras múltiplas torna-se possível a aplicação de funções *spline* ou ajuste de cilindros ao longo do fuste gerando um modelo (PFEIFER; WINTERHALDER, 2004), ou ainda a geração de superfícies utilizando um modelo de triangulação entre pontos (ASCHOFF; THIES; SPIECKER, 2004). Hopkinson *et al.* (2004) apresentaram uma comparação dos volumes obtidos por métodos tradicionais e a varredura *laser*. Os resultados mostram que não existe uma tendência clara quanto à subestimação ou superestimação quando comparados com dados tradicionais.

A modelagem de troncos de árvores a partir de dados de varredura simples com *laser* terrestre pode ser feita com circunferências a alturas variáveis sob um centro comum usando um algoritmo de ajuste por mínimos quadrados (LIANG *et al.*, 2008; BIENERT *et al.*, 2006, BIENERT *et al.*, 2007; LITKEY *et al.*, 2008).

Para modelagem do tronco Király e Brolly (2010) aplicaram as fórmulas de volume para quatro tipos de conóides: Cilindro, parabolóide, cone e neilóide usando o fator de forma comum (1,3 m). Para cada um dos tipos aplicaram-se os quatro métodos de extração da área transversal, descritos no tópico determinação das áreas transversais. Os resultados encontrados entre os tipos de conóides aplicados diferenciaram-se muito pouco, normalmente abaixo de 0,1%. Porém, a aplicação dos polígonos de forma livre (FFP) foi mais realista que os outros métodos de determinação da área transversal.

Gatziolis *et al.* (2010) utilizaram cilindros para modelagem do tronco avaliados repetidamente para minimizar a chance de que as dimensões do mesmo fossem afetadas por pontos de galhos ou folhagem. Os resultados mostraram existir uma tendência de subestimação dos resultados de volume. Para os dados coletados com uma densidade de pontos padrão, a tendência foi maior quando comparado com a coleta de dados com alta densidade de pontos *laser*. As árvores que apresentaram subestimação perderam a parte superior do tronco no momento da modelagem. Essas perdas nos casos mais extremos chegaram a 40% do comprimento total da árvore. Nesses casos, é possível recuperar as seções considerando uma redução linear dos diâmetros interpolando as regiões sem informações. Embora seja possível, o uso dessa interpolação não é recomendado para o desenvolvimento de equações de volume. Segundo esses autores, os

resultados confirmam estudos anteriores em que as partes superiores dos troncos não podem ser modeladas usando *laser scanner* terrestre.

Não se pode esperar que se consiga reconstruir todas as árvores em uma amostragem, principalmente por varredura simples, a não ser que as árvores sejam caducifólias e encontrem-se sem folhas. Em casos especiais, entretanto, em que as árvores serão medidas individualmente pelo *laser*, o operador do equipamento poderá posicionar o *scanner* em pontos estratégicos, aumentando a probabilidade de sucesso na reconstrução do tronco e no desenvolvimento de equações de volume. Segundo as experiências de Gatziolis *et al.* (2010) é preferível utilizar o *scanner* a uma distância maior das árvores com uma maior densidade de pontos do que posicionar o equipamento mais próximo da árvore com uma densidade de pontos menor.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este tópico apresenta os procedimentos metodológicos utilizados para alcance dos objetivos de pesquisa. Para esclarecer os passos que a metodologia seguiu elaborou-se um fluxograma simplificado FIGURA 4.

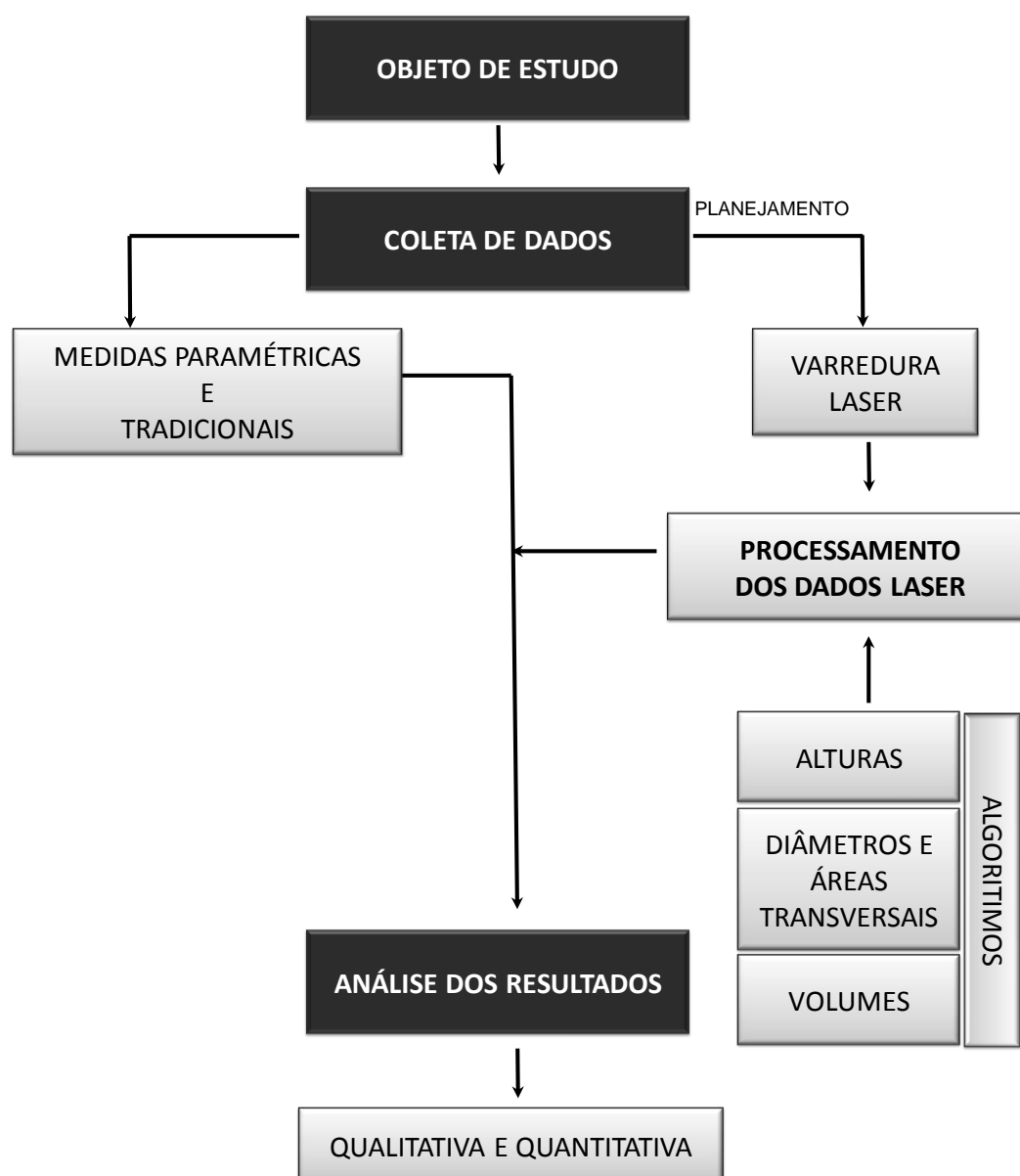


FIGURA 4 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DA METODOLOGIA DE TRABALHO
 FONTE: Elaborado pelo Autor (2011)

3.1 OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo desta dissertação são 12 árvores de *pinus* localizadas em um povoamento de regeneração natural no Campus Jardim Botânico da Universidade Federal do Paraná, na cidade de Curitiba.

O povoamento não tem um espaçamento bem definido, densidade heterogênea (700 a 3000 indivíduos/ha) e engloba árvores de diversas idades distribuídas entre as espécies *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*. A área é caracterizada por um relevo suave ondulado.

Para ilustrar a localização e o aspecto deste povoamento elaborou-se a FIGURA 5, onde se pode identificar o município de Curitiba no mapa do estado do Paraná, uma vista aérea do Campus Jardim Botânico com a delimitação do talhão e suas coordenadas UTM, juntamente com uma foto terrestre do aspecto das árvores incluindo a árvore 12 (uma das árvores analisadas).



FIGURA 5 – LOCALIZAÇÃO DO POVOAMENTO EM ESTUDO. ACIMA, DO LADO DIREITO, OS MAPAS DO BRASIL, PARANÁ E DA CIDADE DE CURITIBA. À ESQUERDA IMAGEM AÉREA COM COORDENADAS DO POVOAMENTO. À DIREITA E ABAIXO FOTOGRAFIA DO TALHÃO.
FONTE: Elaborado pelo Autor (2011)

3.2 EQUIPAMENTOS E SOFTWARES UTILIZADOS

3.2.1 *Laser Scanner* Terrestre

O equipamento *laser scanner* terrestre *Leica HDS 3000* (FIGURA 6) utilizado é fabricado pela *Cyrax Technologies* nos Estados Unidos, a qual é subsidiária da empresa *Leica Geosystems*.



FIGURA 6 – LASER SCANNER TERRESTRE HDS 3000
FONTE: O Autor (2011).

O sistema de varredura baseia-se no tempo de voo do sinal (*Time of Flight*) descrito com detalhamento na revisão de literatura sobre equipamentos de varredura *laser* terrestre. Para operar possui um tripé, alvos, baterias, cabos para baterias e rede e um computador com o *software Cyclone 5.1*. A comunicação entre o equipamento e o *software* controlador é realizada por endereço de IP (*Static Internet Protocol Address*).

As dimensões da unidade *laser* são de 26,5 cm x 37,0 cm x 51,0 cm, pesando aproximadamente 17 kg. Cada bateria que fornece energia para o sistema *laser* pesa em torno de 12 kg. Para aumentar o tempo de utilização do *scanner* o equipamento conta com 2 baterias. O sistema possui uma câmara fotográfica digital

de 1 megapixel acoplada internamente ao equipamento permitindo fotografar previamente os objetos de interesse e atribuir um valor de RGB para cada ponto obtido.

O sistema *laser* faz as medições por meio de duas janelas de captura, uma na parte frontal e a outra na parte superior do equipamento. O feixe de luz é direcionado por espelhos internos para uma das janelas possibilitando uma varredura com campo de visão (*Field Of View* – FOV) de 360 graus na horizontal e 270 graus na vertical em função dos 90 graus de exclusão do tripé.

Esse modelo pode coletar 1800 pontos por segundo a uma distância de 100 metros para uma taxa de reflectância de 10%. A taxa de amostragem também é influenciada pelo campo de visão e resolução escolhidas podendo chegar ao máximo de 4000 pontos por segundo. Uma vantagem dos sensores ativos, que é encontrada no *laser scanner* terrestre, é a possibilidade de operação tanto diurna como noturna.

A cor do feixe de luz é verde classificado como 3R seguindo os padrões do IEC 60825-1:2001 (*International Electrotechnical Commission*). Segundo esta classificação, o equipamento é seguro quando manipulado com cuidado e potencialmente perigoso aos olhos se observado por meio de instrumentos óticos. O *laser* é considerado de baixa potência.

A resolução máxima do *scanner* é de 1 ponto a cada 1,2 mm para uma distância máxima de 100 m e cada varredura pode conter no máximo 20000 pontos por linha e 50000 pontos por coluna. Sempre que se ultrapassar esse limite, a varredura deverá ser feita em mais de uma etapa. A acurácia posicional do *scanner* é de 6 mm, na medição de distâncias é 4 mm e na medição de ângulos 60 microradianos (tanto na horizontal quanto na vertical).

3.2.2 Alvos planos refletores

Os alvos planos refletores são utilizados para o registro ou união de nuvens de pontos obtidas por varredura múltipla. Funcionam como pontos de referência que devem estar presentes nas múltiplas cenas.

Os modelos de alvos utilizados possuem a cor azul nas bordas e branca no centro e em função desta diferença de refletância, podem ser reconhecidos automaticamente após a varredura usando o *software* gerenciador do *scanner*. A diferença básica entre os dois modelos utilizados está no tamanho e forma. Um é quadrado e de menor tamanho (3 x 3 polegadas) e o outro é circular e de maior tamanho (6 polegadas de diâmetro) conforme pode ser visualizado na FIGURA 7.

O alvo quadrado é indicado para menores distâncias em relação ao *scanner* enquanto que o circular pode estar um pouco mais afastado. Ambos podem ser montados sob uma plataforma metálica ou podem ser colados como adesivos em qualquer superfície plana.



FIGURA 7 – ALVOS PLANO REFLETORES UTILIZADOS NO LEVANTAMENTO LASER
FONTE: O Autor (2011).

É importante citar que esses alvos também podem ser lidos por equipamentos tradicionais como, por exemplo, uma estação total. Isto permite o transporte de coordenadas para os alvos e o posterior georreferenciamento de todos os pontos da nuvem de pontos.

3.2.3 Hipsômetros

Nesta pesquisa foi utilizado o hipsômetro *Vertex III*. O equipamento emprega impulsos ultrassônicos para medir distâncias, ângulos e alturas

diretamente. É composto pelo hipsômetro e por um *transponder* (transmissor-receptor) conforme apresentado na FIGURA 8. É um equipamento moderno com elevada velocidade de medição das alturas de forma bastante acurada. Permite a medição de objetos com até 100 metros de altura, estando a uma distância de 0 a 30 metros de afastamento do objeto. O erro cometido pode ser de cerca de 10 cm para distâncias de até 20 metros da árvore (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006).



FIGURA 8 – HIPSÔMETRO VERTEX III
FONTE: TMFOREST (2011).

3.2.4 Medidores de Diâmetros

Para as medidas tradicionais de diâmetros foram utilizados dois instrumentos: suta e fita métrica.

O modelo utilizado foi a suta mecânica *Mantax* produzida pela *Haglof* com 500 mm (FIGURA 9).



FIGURA 9 – SUTA HAGLOF MANTAX
FONTE: Eloforte (2011).

Matematicamente sabe-se que para um mesmo perímetro a figura geométrica que apresenta a maior área é um círculo. Portanto, no caso da medição dos diâmetros pela derivação do perímetro medido, as estimativas tendem a superestimar os valores reais das seções transversais. Ainda assim, a fita métrica é o equipamento atualmente mais indicado para medição de diâmetros em parcelas de inventário florestal permanente, pois é possível medir na mesma posição durante vários anos de medição o que é difícil de ser realizado com o uso da suta.

Igualmente à fita métrica, a medição de diâmetros por suta implica em um cálculo da área transversal das seções considerando a posição de medida como sendo um círculo perfeito.

3.2.5 Xilômetro

Para medição dos volumes reais (paramétricos) de algumas árvores utilizou-se um xilômetro. O equipamento foi construído com dois tonéis de latão de 400 litros. A escala do equipamento consiste em uma régua de alumínio graduada em dm^3 (litros) que é acoplada ao equipamento. Em uma dada posição do tambor existe uma saída de água onde é colocada uma mangueira transparente que fica montada internamente na escala de alumínio onde são realizadas as leituras de volume (FIGURA 10).

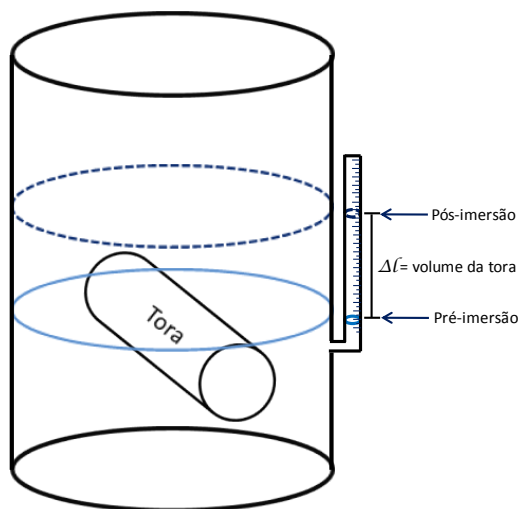


FIGURA 10 – XILÔMETRO

FONTE: Elaborado por André Leonardo Bortolotto Buck.

O método de determinação de volume por xilômetro baseia-se no princípio de deslocamento de água. Em outras palavras, o volume de água que um corpo submerso desloca é igual ao seu volume.

3.2.6 *Software Cyclone 5.1*

O *software Cyclone* da Leica Geosystems é composto por inúmeros módulos que permitem a operação do *scanner*, a visualização dos dados coletados, a manipulação e edição dos dados, o registro ou união de nuvens de pontos, entre outras funcionalidades. Neste estudo, foi utilizado para o gerenciamento do *scanner* durante a coleta de dados, para visualização, registro ou união das nuvens de pontos de diferentes visadas e para filtragem manual das árvores.

O programa permite exportar os dados para formatos com compatibilidade para outros *softwares*, como por exemplo, o *AutoCAD*, além de exportar para formatos texto que podem ser lidos por diversos programas.

A importação de dados de outros *scanners*, como os produzidos pela *Faro*, *Riegl* e *Optech*, é possível permitindo que organizações que trabalham com vários modelos de *scanner* possam utilizar somente um *software* para o processamento dos dados *laser*.

Internamente o *Cyclone* permite modelar objetos com forma fixa tais como cilindros, circunferências, cones, esferas, segmentos de linhas. A medição de distância entre pontos e dos pontos em relação ao *scanner* também é de fácil obtenção.

3.2.7 *Software Visual Basic for Applications*

A plataforma *Microsoft Visual Basic for Applications* (VBA) que está incorporado no Microsoft Excel foi utilizada para programar rotinas de cálculo para obtenção das variáveis dendrométricas e elaboração do programa final de medições dendrométricas para dados *laser scanner* terrestre. A vantagem desta linguagem de

programação está na compatibilidade com o Excel e na facilidade de utilização de várias ferramentas que já se encontram implementadas.

3.2.8 Software SISVAR

O *software* foi utilizado para realizar o teste de *Tukey* tanto para delineamento inteiramente ao acaso quanto para blocos ao acaso. O programa está na versão 5.3 foi desenvolvido por Daniel Furtado Ferreira na Universidade Federal de Lavras (DEX/UFLA). É gratuito e realiza uma série de procedimentos estatísticos.

3.2.9 Software ASSISTAT

Programa utilizado para realizar os testes de *Bartlett*. É um *software* gratuito desenvolvido pelo professor Dr. Francisco de Assis Santos e Silva da Universidade Federal de Campina Grande. Atualmente encontra-se na versão 7.6 beta.

3.3 PLANEJAMENTO E COLETA DE DADOS

A aplicação dos equipamentos *laser scanner* terrestre no meio florestal, principalmente no Brasil, é bastante incipiente. A forma de coleta de dados, bem como o planejamento desta atividade ainda é pouco estudada. Desta forma, houve a necessidade de realizar um bom planejamento de coleta para evitar possíveis falhas que somente seriam percebidas no processamento final dos dados *laser*.

Para o planejamento e realização das medições foi determinante a escolha de uma unidade experimental (árvores) próximas ao prédio de ciências florestais da UFPR. Isto porque, o equipamento *laser* utilizado é um equipamento um pouco antigo possuindo algumas limitações de uso no que diz respeito à duração das baterias e transporte do equipamento dentro da floresta. Vale lembrar que o

equipamento pesa aproximadamente 17 kg, cada bateria 12 kg e ainda é necessário o uso de um notebook o qual não consegue operar por mais de 3 horas com a mesma bateria. Outro aspecto importante da proximidade foi a possibilidade de imediatamente após a coleta de dados checar possíveis problemas e corrigi-los re-planejando a coleta.

Assim, o planejamento iniciou pela escolha das 12 árvores objeto de estudo TABELA 1. As árvores foram escolhidas buscando abranger as principais classes diamétricas presentes no povoamento. Algumas árvores foram estrategicamente escolhidas pela boa localização (facilitando a instalação do *laser*) e outras por características morfológicas que possuíam como, por exemplo, a árvore 2 que estava morta sem nenhuma acículas.

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO DENDROMÉTRICA DAS ÁRVORES EM ESTUDO
FONTE: O Autor (2011)

Árvore	dap (suta)	ht
1	17,65	15,2
2	14,4	14,1
3	9,85	11
4	12,1	14,1
5	11,55	14,3
6	15,45	14,1
7	17,9	17,7
8	12,45	12,4
9	10,15	14,5
10	18	15,3
11	15,55	14,1
12	17,7	15,2

Após a escolha das árvores partiu-se para demarcação das mesmas. Este procedimento se fez necessário para que as medidas *laser*, tradicionais e paramétricas fossem tomadas exatamente nos mesmos pontos e também para facilitar a identificação das árvores nas nuvens de pontos *laser*. Para tal, cada árvore foi identificada com um número marcado com tinta *spray* (número da árvore). Na altura 0; 1,3; 2,3; e 3,3 foi fixada uma fita adesiva de cor branca ao longo do perímetro do fuste para que tanto na nuvem de pontos *laser* quanto para os dados de medidas tradicionais e paramétricos as avaliações ocorressem exatamente nas mesmas alturas.

A escolha da fita branca se deu após alguns testes com fita vermelha lisa. Durante as coletas de teste notou-se que a fita vermelha lisa não era adequada, pois

os pontos *laser* não eram refletidos e nessas alturas de interesse se tinha um vazio de pontos. Desta forma, realizou-se uma nova coleta teste usando a fita branca que se demonstrou bastante adequada para identificação pela diferença de intensidade dos pontos *laser* na nuvem.

Nas coletas teste vários parâmetros foram testados como a variação da resolução do equipamento *laser scanner* buscando encontrar um limite entre qualidade e velocidade de coleta.

Do ponto de vista das medições tradicionais e paramétricas o planejamento foi necessário para obtenção de autorização para o corte das árvores, alocação do xilômetro para medição dos volumes paramétricos, determinação da forma de retirada e transporte das toras até o xilômetro e definição da equipe necessária para coleta.

A coleta de dados foi realizada durante os meses de fevereiro, março e abril de 2011, onde foram levantadas todas as medidas de campo tradicionais, os valores paramétricos e os dados *laser scanner* terrestre *Leica HDS-3000*.

3.3.1 Medidas tradicionais

As medidas tradicionais foram realizadas em dois momentos distintos: árvore em pé e árvore derrubada. Em cada uma das ocasiões foram medidas algumas variáveis dendrométricas.

As alturas das árvores foram medidas com hipsômetro *Vertex III* utilizando a média de três repetições de medida para evitar a ocorrência de erros acidentais. Após a derrubada das árvores mediu-se a altura com trena valor este considerado como valor verdade.

Os diâmetros ao longo do fuste, inclusive o DAP, foram medidos após a derrubada das árvores utilizando a fita métrica e a suta *Mantax*. As alturas de medição de diâmetros foram tomadas seguindo a metodologia de cubagem rigorosa de *Hohenald* modificado conforme exemplificado no QUADRO 3. Além dos diâmetros de 0,1 a 3,1 m com intervalos de medição de meio metro conforme FIGURA 11.

Para essas medidas tradicionais as áreas transversais de cada seção foram calculadas usando a fórmula da área da circunferência tendo o diâmetro medido com a suta e com a fita como base para aplicação na fórmula.

Finalmente, os volumes das três primeiras toras foram determinados utilizando cubagem rigorosa pelos métodos de *Smalian*, *Huber* e *Newton*.

Medidas em relação a altura total das árvores	
FATIA 1	5%
FATIA 2	15%
FATIA 3	25%
FATIA 4	35%
FATIA 5	45%
FATIA 6	55%
FATIA 7	65%
FATIA 8	75%
FATIA 9	85%
FATIA 10	95%

QUADRO 3: COLETA DE DIÂMETROS EM CAMPO PELO MÉTODO DE HOHENALD MODIFICADO
FONTE: O Autor (2011).

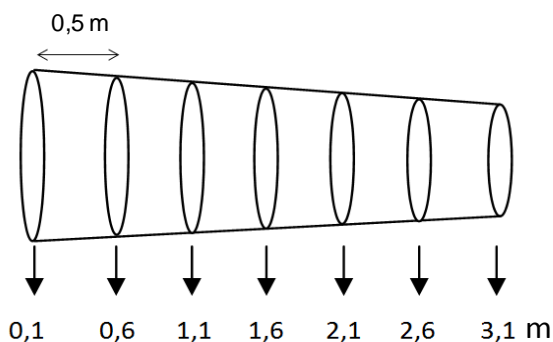


FIGURA 11 – DIÂMETROS MEDIDOS A CADA 0,5 M PARA CALCULO DOS DEMAIS MÉTODOS DE CUBAGEM
FONTE: O Autor (2011).

3.3.2 Medidas paramétricas

As medidas paramétricas foram coletadas com o intuito de validar as medidas *laser* e tradicionais. Desta forma, buscou-se considerar como medida paramétrica a medida mais precisa que poder-se-ia considerar para cada variável que será analisada.

Assim, as variáveis medidas foram:

- altura total das árvores medidas com a trena após a derrubada;

- b) área transversal fotografada em escala para as fatias 1,3 ; 2,3 e 3,3 metros (FIGURA 13);
- c) volume das 3 primeiras toras de um metro determinados por xilômetro;

O procedimento metodológico para fotografar as fatias consistiu em colocar cada uma das 36 fatias sobre uma cartolina de cor diferenciada das que poderiam ocorrer em cada seção da árvore. Sobre cada uma das fatias foi posicionado um alvo de dimensões 5 x 5 cm de coloração azul para fixação de escala. A câmera digital FujiFilm FinePix S5700 com resolução de 7.1 megapixels foi utilizada sobre uma base confeccionada (FIGURA 12) para estabelecer uma distância e inclinação da máquina padrão para todas as fatias fotografadas. Desta forma, cada fatia foi registrada por uma foto padrão conforme apresentado na FIGURA 13.



FIGURA 12 – BASE CRIADA PARA FOTOGRAFAR AS FATIAS
FONTE: O Autor (2011).



FIGURA 13 – FOTOGRAFIA DE UMA FATIA
FONTE: O Autor (2011).

3.3.3 Dados *laser scanner* terrestre

A coleta de dados *laser* com o equipamento *Leica HDS 3000* foi realizada nas 12 árvores por meio de varredura múltipla, compreendendo de duas a três bases de instalação do equipamento conforme particularidades de visualização de cada árvore. É importante ressaltar que cada uma das bases de instalação do equipamento corresponde a uma coleta de dados por varredura simples. Portanto, a abordagem metodológica da coleta de dados *laser* permite analisar os dados tanto para o sistema de nuvem de pontos de varredura múltipla quanto de varredura simples.

A resolução da coleta de dados foi: na horizontal de 1 ponto para cada 0,5 cm e na vertical variou entre 1 ponto a cada 0,8 cm e 1 ponto a cada 1 cm visto que a resolução na vertical possui uma menor importância quando comparada com a horizontal para este estudo. Isto se deve a que uma pequena diferença de 1 cm na vertical representa muito pouco na altura total das árvores, já 1 cm em diâmetros (valor dependente da resolução horizontal) representa um percentual muito maior. Assim, deu-se uma preferência por manter uma resolução maior na horizontal que na vertical.

Na QUADRO 4 são apresentadas as resoluções de varredura para cada uma das árvores juntamente com o número de varreduras. O parâmetro “range”, garante a resolução prevista para uma dada distância, ou seja, até 15 ou 12 metros dependendo da árvore é garantido que existirão pelo menos 1 ponto a cada 0,5 cm na horizontal e 0,8 a 1 cm na vertical.

Árvore	Número de Varreduras	Resolução (cm)		Range (m)
		Horizontal	Vertical	
1	2	0,5	0,8	15
2	2			
3	2			
4	2			
5	2		1	
6	2			
7	3			
9	2			
10	2			
8	2			
11	3			
12	3			
				12

QUADRO 4: DADOS DA RESOLUÇÃO DO SCANNER NO MOMENTO DAS COLETAS DOS DADOS DAS 12 ÁRVORES
 FONTE: O Autor (2011).

Para cada conjunto de varreduras por árvore foi necessário realizar um procedimento técnico. Quando trabalha-se com varreduras múltiplas, para a maioria dos *scanners*, existe a necessidade da instalação de alvos plano refletor que permitem a posterior união das nuvens de pontos em um mesmo sistema de coordenadas. Esses alvos foram instalados em um número mínimo de três em posições onde eram bem visualizados de todas as bases de instalação do equipamento. Cabe o cuidado de instalar os alvos em lugares bem fixados e distribuídos de boa forma sobre os eixos X, Y e Z. O mau posicionamento dos alvos, seja pela alocação em superfícies pouco rígidas ou má distribuição em relação aos eixos, pode acarretar em um deslocamento na união da nuvem de pontos e, conseqüentemente, erros na determinação das variáveis dendrométricas.

3.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS TRADICIONAIS E PARAMÉTRICOS

O processamento dos dados tradicionais consistiu na organização em planilhas eletrônicas, cálculos dos diâmetros obtidos por meio do perímetro medido com a fita métrica ($\text{perímetro}/\pi$), processamento das imagens digitais das fatias

cortadas a 1,3; 2,3 e 3,3 metros e o cálculo dos volumes de cubagem rigorosa e xilômetro.

O processamento das imagens digitais foi realizado utilizando técnicas de classificação digital pelo método da máxima-verossimilhança (FIGURA 14). Posteriormente as imagens foram editadas em um sistema de informação geográfica para o cálculo de áreas das fatias.

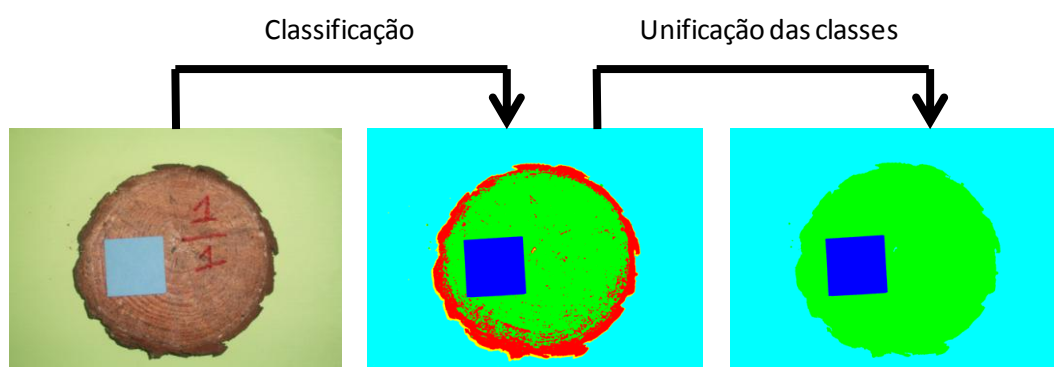


FIGURA 14: DEMONSTRAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DIGITAL DAS FOTOGRAFIAS.

Os cálculos de volume por medidas tradicionais foram realizados pelo método de *Smalian*, *Huber* e *Newton* utilizando as medidas da suta e da fita.

Para o cálculo do volume por *Smalian* para cada tora ou seção de 1 metro utilizou-se a Equação 2:

$$v = \left(\frac{g_1 + g_2}{2} \right) * l \quad (2)$$

Onde: l é o comprimento da seção;

g_1 é a área transversal da seção da base da tora;

g_2 é a área transversal da seção da ponta da tora;

v é o volume da tora.

Para o método de cubagem de *Huber*, somente é considerado para cálculo do volume a seção central de cada tora. Neste caso para a primeira tora que vai de 0,1 a 1,1 metros é tomado como medida desta tora a área transversal a 0,6 metros. Aplica-se então a Equação 3 para todas as toras:

$$v = g_m * l \quad (3)$$

Onde: l é o comprimento da tora;

g_m é a área transversal da seção do meio da tora;

v é o volume da tora.

Por fim, o último método de cubagem utilizado foi o método de *Newton* que considera três posições de medição em cada tora, ou seja, considera as medidas de *Smalian* e de *Huber*, porém dando um maior peso para a medida da área transversal central. Desta forma, o cálculo de volume por *Newton* é feito para cada tora utilizando a Equação 4:

$$v = \left(\frac{g_1 + 4*g_m + g_2}{6} \right) * l \quad (4)$$

Onde: l é o comprimento da tora;

g_1 é a área transversal da seção da base da tora;

g_m é a área transversal da seção do meio da tora;

g_2 é a área transversal da seção da ponta da tora;

v é o volume da tora.

Ainda abordando os volumes, foi obtido para cada uma das árvores o valor paramétrico pela imersão das toras em água no xilômetro. O procedimento de cálculo de volume por esta metodologia baseia-se em observar após a imersão de cada tora o deslocamento de água em uma escala conhecida. Cada uma das toras de 1 metro de comprimento foi submergida independentemente no equipamento para a medição.

3.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS *LASER*

O processamento dos dados *laser* compreende todos os aspectos relacionados ao tratamento dos dados coletados até a obtenção das variáveis

dendrométricas de interesse. Para tal, foi realizada uma divisão dos principais procedimentos para alcançar os objetivos propostos utilizando dados de varredura simples e múltipla. Inicialmente é apresentado o método de obtenção da nuvem de varredura múltipla, ou seja, a união das varreduras simples. Posteriormente é abordado o método utilizado para a filtragem dos dados, as metodologias empregadas para a extração das variáveis dendrométricas e, por fim, a unificação das metodologias em um programa computacional especialmente desenvolvido para o processamento dos dados.

3.5.1 União das nuvens de pontos

A união foi realizada usando o *software Cyclone*. Os alvos, varridos com alta resolução no momento da aquisição de dados, foram identificados e nomeados, devendo o alvo presente na varredura 1 e 2 ser identificado com o mesmo nome.

Após a identificação e nomeação dos alvos o *software* realiza o registro apresentando, previamente a união final dos dados, um erro relacionado a cada um dos alvos. Quando o erro é próximo à resolução escolhida para trabalhar com o equipamento considera-se que a união está de acordo com o esperado. Quando isto não acontece deve-se observar se a identificação do ponto central do alvo foi realizada de forma correta. Caso não seja este o problema, é necessária uma análise mais detalhada do problema sendo, em último caso, uma nova coleta de dados a solução mais coerente.

Ao final tendo um limite de erro aceitável (inferior ao valor de resolução escolhido) é dado um comando ao *software* que realiza a união dos pontos em um mesmo sistema de coordenadas por meio da triangulação com os alvos identificados.

3.5.2 Filtragem das nuvens

A filtragem das nuvens de pontos foi realizada de forma interativa para as varreduras simples de cada árvore (antes da união das nuvens) e para as

varreduras múltiplas (após a união das nuvens) com o intuito de obter dados dendrométricos por meio de várias varreduras simples e múltiplas.

O primeiro passo foi identificar por meio dos números pintados com tinta *spray* as árvores. Após a devida identificação procedeu-se o isolamento de cada uma das árvores do restante de dados. Com cada árvore isolada procedeu-se com a eliminação dos pontos pertencentes ao solo, galhos, folhas da copa e demais objetos não pertencentes ao tronco da árvore de interesse. Este procedimento foi efetuado visualmente.

Outro aspecto observado durante a filtragem foi a identificação de possíveis problemas na coleta de dados que poderiam refletir na qualidade dos resultados dendrométricos tais como presença de vento, baixa amostragem de pontos no fuste a partir do início da copa, entre outros.

3.5.3 Obtenção das alturas

A obtenção das alturas foi efetuada por rotina programada em linguagem VBA. A altura zero da árvore foi determinada no momento da filtragem onde se identificou a fita branca colada na altura zero demarcada antes da coleta de dados *laser*. A identificação da fita é possível conforme mostra a FIGURA 15 devida a elevada diferença de reflectância entre os alvos fita e fuste. Os pontos da fita aparecem em verde destacando-se dos demais pontos.

A metodologia aborda a altura total como sendo a diferença entre o ponto de maior cota Z e o ponto de cota zero determinado no momento da filtragem. Neste caso, se existir um ponto isolado (*outlier*) com cota Z fora dos padrões normais a altura pode ser fortemente alterada em relação aos valores reais indicando problemas de filtragem.

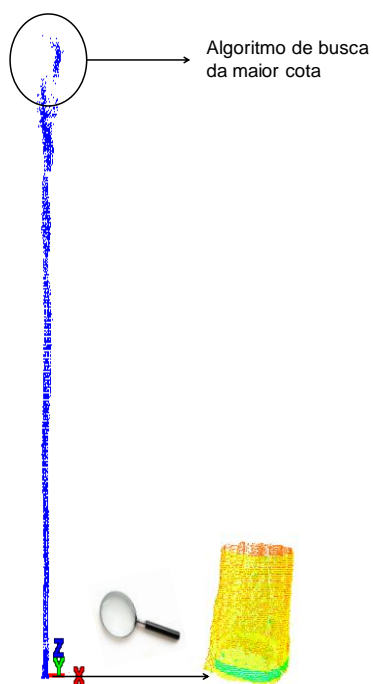


FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO DA IDENTIFICAÇÃO DA BASE DAS ÁRVORES (COTA ZERO) E DO TOPO (MAIOR COTA)
 FONTE: Elaborado pelo Autor (2011)

3.5.4 Obtenção de diâmetros e áreas transversais

Os diâmetros e áreas transversais foram determinados por 4 métodos distintos atribuídos com os nomes de Distância Máxima (DM), Circunferência ótima (CO), Área *Laser* (AL), Área *Laser* Modificado (ALM). Cada um deles será descrito em detalhes nos tópicos subseqüentes. Cada método foi aplicado para varredura múltipla e simples exceto o AL que foi aplicado unicamente para varredura múltipla. Para identificar em que tipo de varredura o método foi aplicado Colocou-se a letra M ou S a frente do código de cada método. Assim, os métodos de varredura simples ficaram identificados como SDM (Varredura simples Distância Máxima), SCO (Varredura simples Circunferência Ótima), SALM (Varredura simples Área *Laser* Modificado). Os métodos de varredura múltipla ficaram identificados como MDM (Varredura múltipla Distância Máxima), MCO (Varredura múltipla Circunferência Ótima), MAL (Varredura múltipla Área *Laser*), MALM (Varredura múltipla Área *Laser* Modificado). Os diâmetros e áreas transversais foram obtidos para cada um dos

métodos citados para fatias a cada 10 cm ao longo de todo o tronco. Deste conjunto foram separadas as fatias nas alturas em que foram tomadas as medidas tradicionais para que pudesse ser realizada a comparação de resultados.

Cada fatia analisada pelo *laser* foi composta pela seleção de pontos com 2 cm de espessura da altura referência. Assim, a fatia 1,3 m, por exemplo, engloba os pontos que vão de 1,29 a 1,31 metros. Não existem valores recomendados para dimensionar a espessura de fatias com o *laser* para o ajustamento de métodos de determinação de diâmetros e áreas transversais. Desta forma, optou-se por fatias de 2 cm por alguns motivos: grande quantidade de pontos por fatia garantida, pois é o dobro da resolução vertical utilizada e o quádruplo da resolução horizontal adotada; espessura semelhante à da fita branca da demarcação das alturas no momento da coleta de dados; espessura próxima às dimensões do corte das fatias com moto serra.

3.5.4.1 Distância Máxima (DM)

Este método foi proposto por Lingnau *et al.* (2009). A idéia é encontrar os dois pontos em que a distância euclidiana no plano (X, Y) é máxima para uma fatia a uma dada altura da árvore com uma espessura “n” que proporcione uma quantidade de pontos suficiente para representar uma fatia. Esta técnica visa encontrar um valor para o diâmetro próximo ao valor máximo de diâmetro que poderia ser encontrado utilizando uma suta.

O algoritmo que busca os pontos mais distantes foi implementado em VBA. Para compreender melhor o seu funcionamento pode-se interpretá-lo de acordo com o esquema da FIGURA 16.

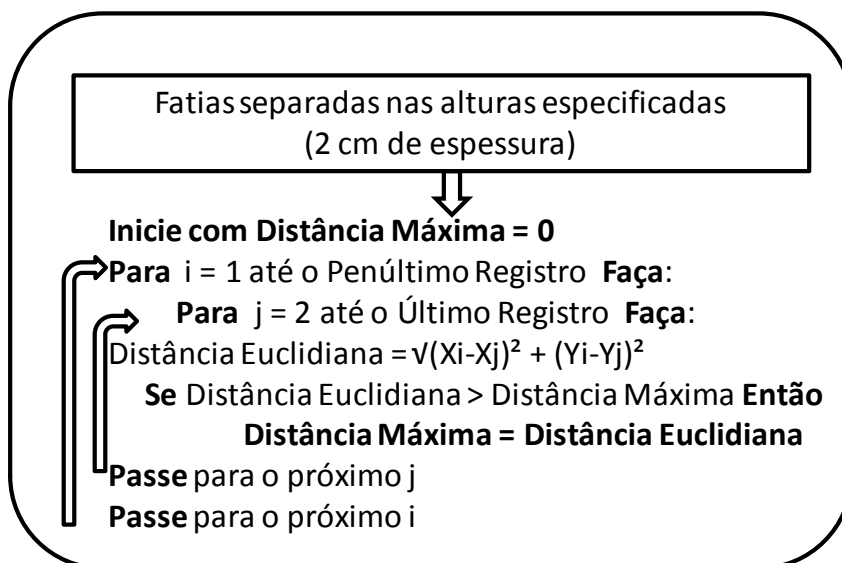


FIGURA 16 – ALGORITMO DO MÉTODO DISTÂNCIA MÁXIMA PARA MEDIÇÃO DE DIÂMETROS
FONTE: O Autor (2011).

O cálculo da área transversal para este método foi realizado de forma semelhante ao que é feito tradicionalmente em inventários florestais. A área transversal é obtida considerando a área de uma circunferência.

3.5.4.2 Circunferência ótima (CO)

O método é semelhante ao proposto por diversos autores (LIANG *et al.*, 2008; BIENERT *et al.*, 2006, BIENERT *et al.*, 2007; LITKEY *et al.*, 2008; ASCHOFF; THIES; SPIECKER, 2004), os quais ajustaram uma circunferência ótima para cada fatia usando o método dos mínimos quadrados.

Embora a metodologia aplicada busque resultados semelhantes, a forma de abordagem e resolução do problema, foi diferenciada. A idéia central é encontrar o ponto que representa o melhor centro de circunferência que pode ser ajustado ao conjunto de dados. Inicialmente, é possível pensar que o melhor centro seria o ponto que representa a média geométrica de todos os valores encontrados para uma dada fatia. Porém, ao abordar dessa maneira depara-se que o resultado está intimamente ligado à densidade de pontos. Em outras palavras, o centro fica sempre próximo do local onde existe uma maior concentração de pontos. Dessa forma, descartou-se a

possibilidade de trabalhar com o centro geométrico como sendo o melhor centro ajustável.

Seguiu-se então desenvolvendo a metodologia buscando compreender de que forma se poderia ajustar um centro realmente ótimo. Após testar a minimização das distâncias euclidianas e do quadrado das distâncias euclidianas em relação ao centro hipotético (média de X e média Y) com resultados ruins chegou-se a um modelo final. O centro ótimo é aquele em que a variância ou o desvio padrão das distâncias entre este centro e todos os pontos da fatia é mínimo.

Partindo desta idéia, montou-se um problema de pesquisa operacional buscando minimizar a função objetivo da Equação (5) abaixo:

$$F.O. \text{ Minimizar } \rightarrow \text{Desvio Padrão}(\sqrt{(X_i - X_c)^2 + (Y_i - Y_c)^2}) \quad (5)$$

Onde: i varia de 1 até o número de pontos de cada fatia;

X_i e Y_i são os valores de X e de Y de cada ponto da fatia;

X_c e Y_c são o valor de X e de Y do centro ótimo e são parâmetros variáveis na função.

Essa função objetivo foi resolvida utilizando o suplemento Solver do pacote Excel. O procedimento de chamada do Solver e de entrada dos parâmetros da função objetivo foi programado em VBA para automatizar os cálculos para todas as fatias. A otimização do centro não pode ser expressa dentro da pesquisa operacional como um modelo linear, assim foi necessário informar um valor de “semente” (valor inicial para os parâmetros) para o centro X_c e Y_c . O valor adotado foi a média geométrica dos pontos da fatia. Para ilustrar esse procedimento a FIGURA 17 mostra o ponto preto como valor inicial do centro (semente) e o valor do centro ótimo (ponto azul) após a resolução. Desta maneira fica claro o aspecto levantado anteriormente onde se abordou que o centro ótimo normalmente difere do centro geométrico de cada fatia. Com o centro ajustado falta determinar qual será o raio ou o diâmetro desta circunferência. Sendo o diâmetro o dobro do raio, optou-se em utilizar a distância média dos pontos em relação ao centro como valor de raio. Assim, a FIGURA 17 mostra como fica o ajuste para uma fatia.

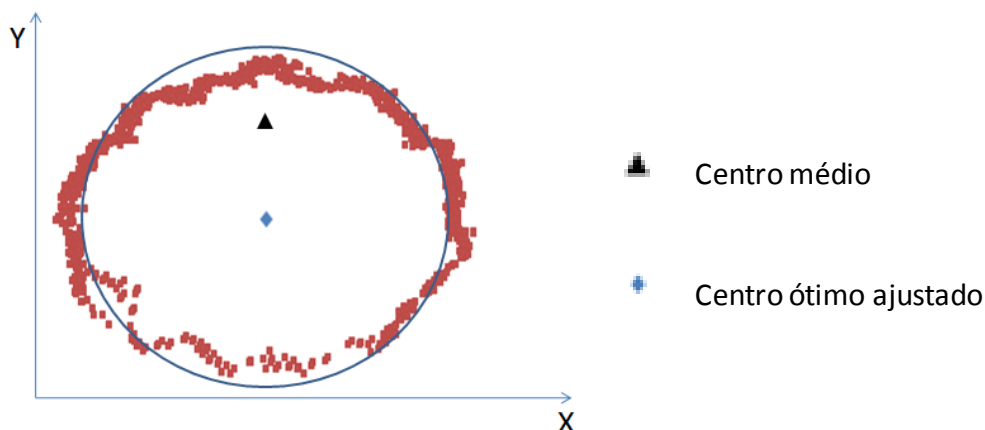


FIGURA 17 – AJUSTE DA CIRCUNFERÊNCIA ÓTIMA (CO)
FONTE: O Autor (2011).

Para esclarecer um pouco mais esta metodologia a FIGURA 18 mostra os passos do algoritmo para chegar ao resultado final para cada fatia. Neste algoritmo quando a nuvem de pontos não é bem filtrada há demora em encontrar o centro ótimo e em muitos casos, em função do valor de “semente” ruim, o algoritmo acaba se perdendo e encontrando falsos centros ótimos principalmente nas partes onde ocorre a copa das árvores.

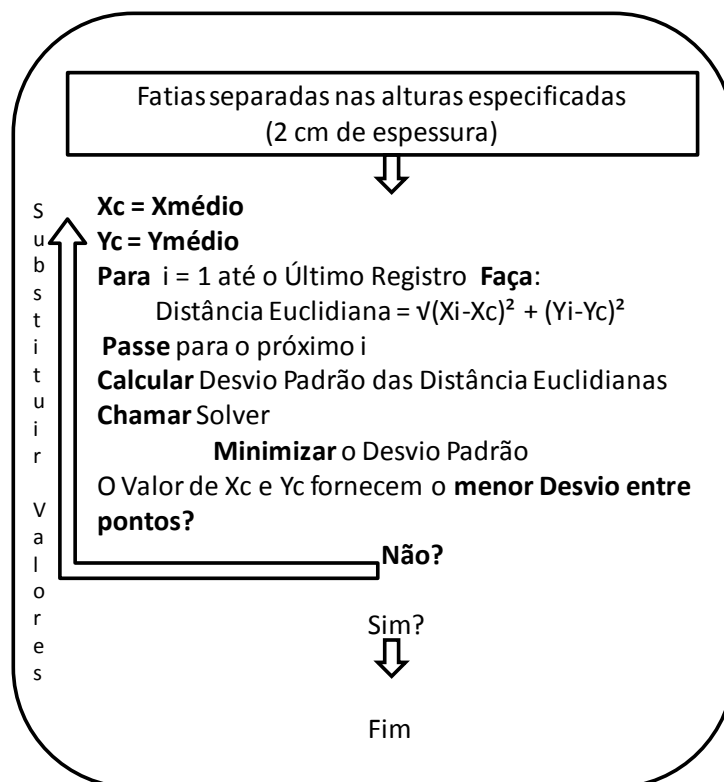


FIGURA 18 – PROCEDIMENTO PARA O CÁLCULO DA CIRCUNFERÊNCIA ÓTIMA (CO)
FONTE: O Autor (2011).

3.5.4.3 Área Laser (AL)

Este terceiro método adota a mesma abordagem da Circunferência Ótima, no entanto, busca encontrar valores de área transversal mais próximos dos reais. Assim, não utiliza o raio médio para calcular a área transversal. O cálculo é realizado utilizando a fórmula de Gauss para determinação de áreas de objetos com formas irregulares para um conjunto de pontos *laser* originais escolhidos

O método foi aplicado de forma semelhante por Pereira e Pereira (2009) e (KIRÁLY e BROLLY, 2010). O Área Laser escolhe os pontos *laser* usando o valor do centro ótimo (X_c e Y_c) e raio médio calculados anteriormente e um algoritmo de busca de vizinho mais próximo. O primeiro passo é calcular um ponto para um determinado azimuth usando o valor do centro ótimo como ponto origem e o valor de raio como valor de distância para aplicação do princípio de transporte de coordenadas utilizado em levantamentos topográficos. Conhecendo a coordenada deste ponto hipotético, é iniciada uma busca pelo ponto *laser* mais próximo. Encontrado, este ponto ficará gravado na memória como ponto 1 acrescentando um determinado valor de ângulo à direção inicial (azimute) encontram-se os demais pontos *laser* os quais são gravados na memória do computador em ordem horária. Desta forma, pode-se aplicar o método de Gauss para o cálculo de área, utilizando a Equação 6. Cabe ressaltar que a coordenada inicial e final deve ser a mesma para que exista o fechamento do polígono.

$$Área = \frac{\sum X_i Y_{i+1} - \sum Y_i X_{i+1}}{2} \quad (6)$$

Onde: X_i e Y_i são as coordenada X e Y de um ponto
 X_{i+1} e Y_{i+1} são as coordenadas do ponto seguinte

Neste estudo, o azimuth foi sendo acrescido em 1 grau a cada novo ponto calculado. As fórmulas para o transporte de coordenadas são apresentadas na Equação 7 (coordenadas X) e Equação 8 (coordenadas Y). A FIGURA 20 demonstra o procedimento do algoritmo para encontrar os pontos *laser* que representam cada fatia.

$$X_i = X_0 + \text{raio médio} * \text{sen}(\alpha) \quad (7)$$

$$Y_i = Y_0 + \text{raio médio} * \text{Cos}(\alpha) \quad (8)$$

FIGURA 19 mostra como resulta a aplicação do método para uma determinada fatia. Vale destacar que os locais onde forma-se uma linha contínua representa ausência de dados.

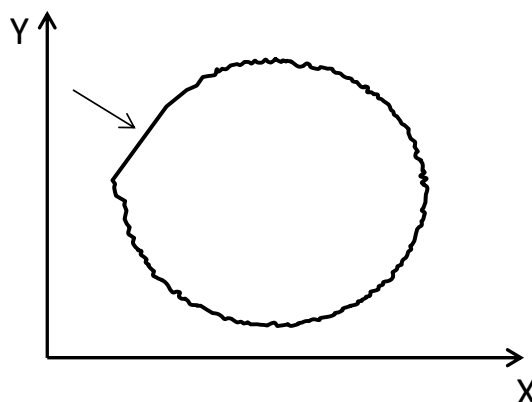


FIGURA 19 – FORMA FINAL QUE TOMAM AS FATIAS APÓS A APLICAÇÃO DO MÉTODO AL.
FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

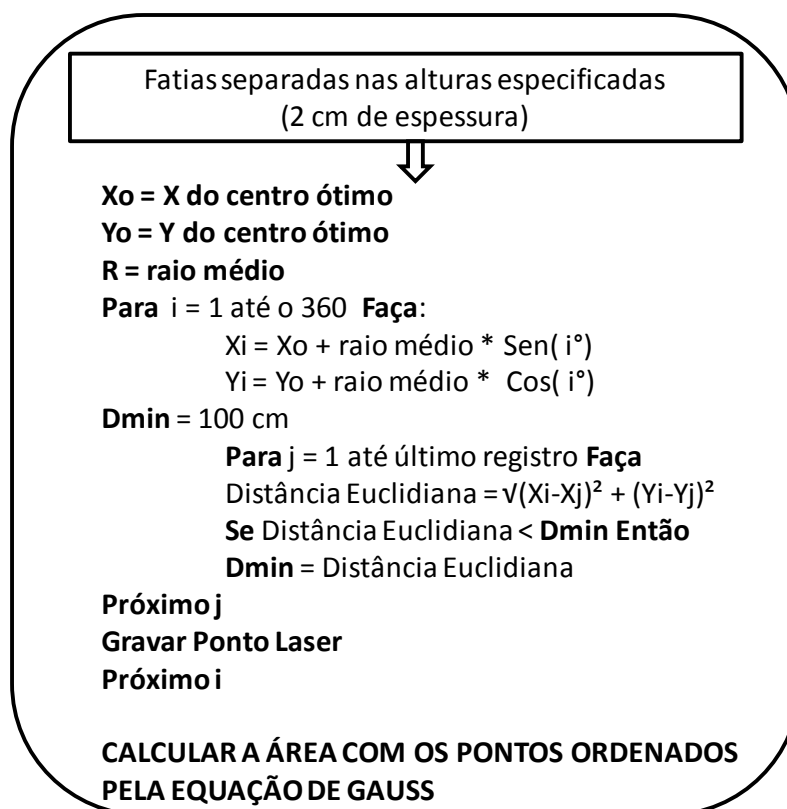


FIGURA 20 – PROCEDIMENTO DE FUNCIONAMENTO DO MÉTODO ÁREA LASER
FONTE: O Autor (2011).

Existem alguns cuidados que devem ser tomados na aplicação deste método, principalmente em fatias de varredura simples e fatias com pequena quantidade de pontos *laser*. Nesses casos, a área calculada pode não representar corretamente a área da seção da fatia, pois o déficit de pontos de pontos *laser* na parte posterior a visada do *scanner* ocasionará um cálculo errôneo sempre subestimando a área transversal real. Com o intuito de aplicar os princípios deste método também em varredura simples e buscando testar qual o melhor método foram feitos alguns ajustes ao método Área Laser originando um quarto método nomeado como Área Laser Modificado que será apresentado no próximo item.

3.5.4.4 Área Laser Modificado (ALM)

O método Área Laser Modificado segue o mesmo embasamento do método Área Laser com uma adaptação que permite a aplicação em varredura simples e busca melhorar os resultados em varreduras múltiplas.

A adaptação mantém o ponto calculado pelo transporte de coordenadas caso não exista nenhum ponto *laser* a uma distância mínima de 0,5 cm do ponto transportado. O valor de 0,5 cm foi escolhido considerando a resolução horizontal definida, teoricamente deveria possuir uma distância entre pontos de 0,5 cm, porém na prática, em função do recobrimento do fuste por folhas, galhos e outros problemas não compreensíveis, a distância entre pontos pode ser um pouco maior principalmente quando atingir as porções da copa. Desta forma, buscou-se recuperar esses pontos *laser* estimando os pontos que não foram capturados por algum motivo.

O procedimento usado possui apenas uma pequena diferença em seu algoritmo conforme é apresentado na FIGURA 22. Embora a diferença seja pequena reflete na possibilidade de aplicação do método em varreduras simples e elimina os problemas de linhas retas contínuas (ausência de dados *laser*) apresentadas do método AL.

A FIGURA 21 mostra a mesma fatia em que foi aplicado o método AL quando aplicado o ALM. Percebe-se a suavização da linha reta que havia na fatia

modelada pelo AL. Ou seja, há um preenchimento da falha existente pela ausência de dados do método ÁreaLaser.

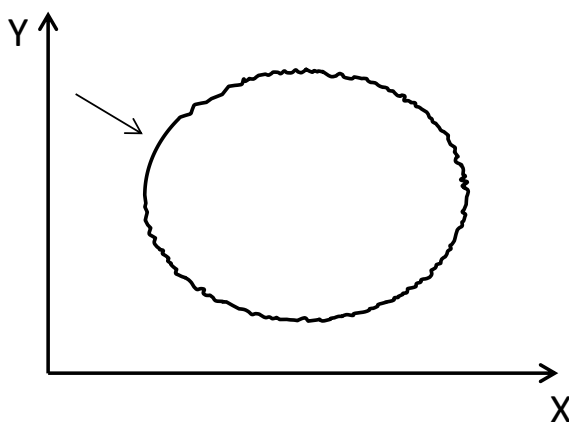


FIGURA 21 – FORMA FINAL QUE TOMAM AS FATIAS APÓS A APLICAÇÃO DO MÉTODO ALM NA MESMA FATIA APLICADA NO MÉTODO AL.

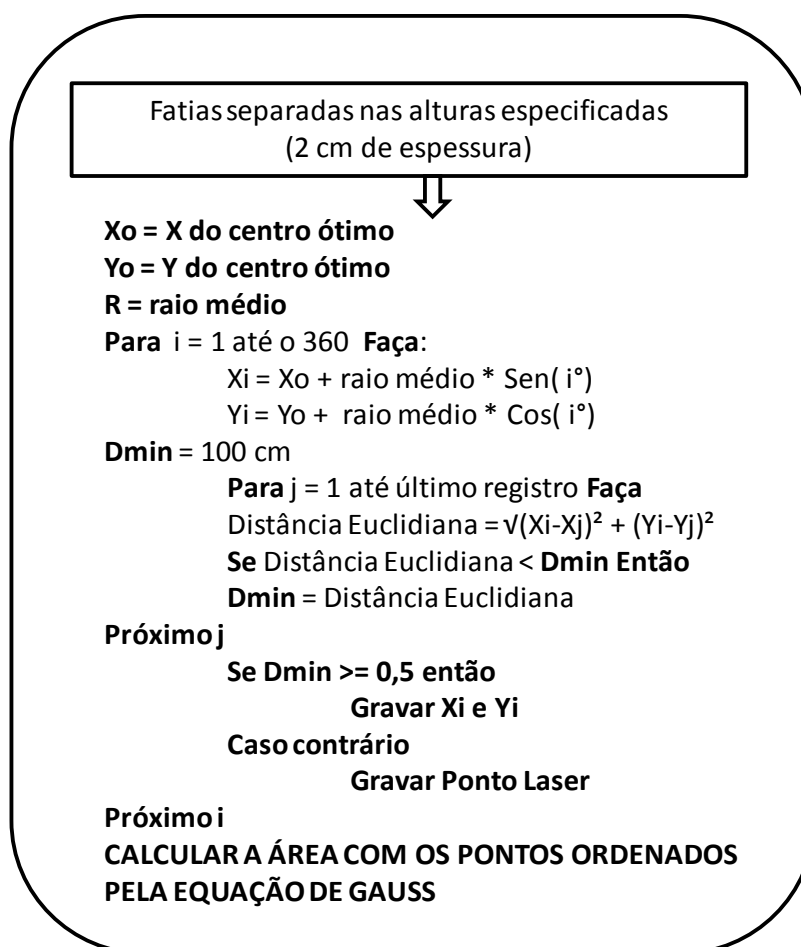


FIGURA 22 – PROCEDIMENTO DE FUNCIONAMENTO DO MÉTODO ÁREA LASER MODIFICADO (ALM).

FONTE: O Autor (2011).

3.5.5 Obtenção de volumes

Existem várias formas possíveis de se calcular o volume utilizando dados de *laser scanner* terrestre. Conforme abordado Pfeifer e Winterhalder (2004) com varreduras múltiplas é possível a aplicação de funções *spline* ou ajuste de cilindros ao longo do fuste, ou ainda, gerar superfícies utilizando triangulação de pontos (ASCHOFF; THIES; SPIECKER, 2004). No entanto, com varreduras simples essas modelagens são de difícil aplicação, pois as partes onde não existem dados *laser* necessitam de uma estimativa de valores o que pode ocasionar grandes erros.

Dadas essas circunstâncias optou-se, para uma comparação mais adequada entre as varreduras simples e múltiplas, aplicar as fórmulas tradicionais de cubagem de *Smalian*, *Huber* e de *Newton* com os resultados de área transversal do melhor método *laser* para varredura simples e múltipla.

O procedimento de cálculo de volumes foi realizado unicamente para as três primeiras toras de 1 metro. São as toras comerciais de maior valor por possuírem as maiores dimensões.

3.5.6 Programa DENDROLASER

O programa DENDROLASER foi especialmente desenvolvido para viabilizar o processamento dos dados *laser* seguindo as metodologias de extração de variáveis dendrométricas apresentadas anteriormente.

O sistema foi desenvolvido em programação orientada a objeto utilizando a linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA). Conta com módulos que realizam a leitura dos dados *laser* e a classificação de pontos para à aplicação dos métodos de extração de variáveis dendrométricas seguindo os algoritmos apresentados anteriormente.

É um programa que segue em desenvolvimento necessitando melhorias de na velocidade de processamento e a adição de novas ferramentas que venham a ser desenvolvidas para utilização de dados *laser scanner* terrestre na engenharia florestal.

3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados foram divididos em: Programa de processamento desenvolvido (apresentação), filtragem (análise qualitativa), alturas (análise quantitativa), diâmetros e áreas transversais (análise quantitativa) e volumes (análise quantitativa). Cada um desses tópicos demandou uma forma de análise com particularidade.

Inicialmente são apresentados os modelos experimentais e principais teste utilizados nas análises estatísticas. Posteriormente, as formas específicas em que foram aplicados para análise de cada resultado são descritas.

3.6.1 Delineamentos experimentais

Para a avaliação dos resultados foram utilizadas duas formas de delineamento experimental.

a) Delineamento inteiramente ao acaso

Delineamento utilizado quando as variáveis analisadas possuíam uma baixa amplitude de variação. Nestes casos, as variáveis dendrométricas não necessitaram ser divididas em classes, pois a variação era pequena.

O delineamento inteiramente ao acaso só pode ser conduzidos quando as unidades (neste caso a variável em análise) forem similares (VIEIRA E HOFFMANN, 1989). Isto não significa que as árvores devam possuir exatamente a mesma altura ou diâmetro, mas sim que não devem existir grandes variações para que seja possível a aplicação como um experimento inteiramente ao acaso.

b) Delineamento em blocos ao acaso

Delineamento utilizado quando as variáveis analisadas possuíam uma alta amplitude de variação. Nestes casos, houve a necessidade de dividir as árvores em

classes de DAP para diminuir a variância e permitir uma análise adequada e realista. A não divisão dos dados em classes (blocos) ocasionaria resultados dos testes estatísticos errôneos, visto que tratamentos que são iguais dentro de um mesmo bloco podem ser diferentes quando analisados como um conjunto único de dados, pois as médias das classes a que pertencem vão ser muito distintas.

Quando existe heterogeneidade nas unidades experimentais convém diminuir a heterogeneidade agrupando em blocos os indivíduos que possuem características semelhantes. Segundo Vieira e Hoffmann (1989), os blocos devem reunir unidades similares, que se diferenciem apenas pelo tratamento que recebem. Além disso, é essencial que exista variabilidade entre os blocos, pois não teria sentido analisar um experimento em blocos ao acaso se não houvesse variabilidade entre esses blocos.

3.6.2 Teste de *Bartlett*

Existem alguns requisitos que devem ser respeitados para que seja aplicada a análise de variância sob um conjunto de dados. Quando não há cuidado de analisar se o conjunto de dados respeita esses quesitos resultados e conclusões equivocados acabam sendo obtidos.

Basicamente, para realizar uma análise de variância é necessário que:

- a) Os erros sejam aleatórios, independentes e com distribuição normal
- b) As variâncias dos tratamentos devem ser homogêneas
- c) As médias e variâncias de diferentes amostras não podem ser correlacionadas
- d) Os efeitos principais devem ser aditivos

Para tal existem testes de normalidade e de homogeneidade das variâncias. Os demais cuidados dizem respeito à forma de análise dos dados e da origem desses dados. Segundo Koehler (1996), os testes de normalidade somente são necessários quando o número de amostras for grande.

As variâncias devem ter magnitude semelhante. Caso contrário segundo Koehler (1996) caracteriza-se heterogeneidade de erros.

Existem inúmeros testes como Hartley, Cochran e *Bartlett*. Nesta dissertação optou-se pelo uso do teste de *Bartlett*.

O teste calcula um valor de χ^2 (Qui Quadrado) e comparada com o valor tabelado. Quando o valor obtido é menor ou igual ao valor tabela conclui-se que as variâncias são homogêneas.

3.6.3 Teste de *Tukey*

O teste de *Tukey* é utilizado para comparar contrastes que possam existir entre médias de tratamentos. Baseia-se na amplitude total estudentizada (Studentized range) (PIMENTEL GOMES E GARCIA, 2002). O cálculo do teste busca determinar qual a menor diferença entre médias de tratamentos para que tratamentos sejam considerados como estatisticamente iguais ou diferentes para um determinado nível de significância (VIEIRA, 1991). Esta diferença é conhecida como: diferença mínima significativa (d.m.s) e pode ser calculada pela Equação 9 a seguir.

$$d.m.s = q \sqrt{\frac{QMR}{r}} \quad (9)$$

Sendo que q é um valor tabelado que deve ser consultado para um número de médias comparadas e graus de liberdade da estimativa da variância experimental (Graus de liberdade do erro experimental). O QMR é o quadrado médio do resíduo retirado diretamente da análise de variância e o r é o número de repetições de cada tratamento.

Com o d.m.s calculado cabe realizar a diferença de cada média em relação as demais. Quando o valor da diferença entre as médias for igual ou superior ao d.m.s as médias são estatisticamente diferentes para o nível de significância

escolhido. Neste teste, médias de tratamentos (métodos testados) iguais são identificado com a mesma codificação de letra.

Segundo Pimentel Gomes e Garcia (2002) o teste de *Tukey* é bastante semelhante ao teste de médias de Duncan, no entanto, é um teste mais conservador, mais rígido. No teste de *Tukey*, ao contrário do teste de Duncan, mantém-se o nível de significância pré-estabelecido independente da quantidade de médias sendo comparadas. Por ser um teste bastante rígido, em alguns casos, podem ser identificadas diferenças entre médias mesmo quando o teste de F da análise de variância indica que não existem diferenças entre médias de tratamentos. Desta forma, optou-se pela aplicação direta do teste de *Tukey* sem analisar previamente o teste de F da análise de variância.

3.6.4 Avaliação da filtragem

Filtragem foi um processo realizado de forma interativa e a análise quantitativa dos resultados acaba sendo inviável, pois existe um viés muito subjetivo.

Como a filtragem foi realizada eliminando os pontos não pertencentes ao tronco de forma visual, cada pessoa que realiza o processo irá obter um resultado diferente. Assim, é complicado avaliar qual a real qualidade da filtragem.

Desta forma, a análise dos resultados foi qualitativa. Buscou-se identificar problemas oriundos da filtragem e da coleta de dados, os quais poderiam afetar diretamente a qualidade dos resultados das variáveis dendrométricas obtidas pelo *laser scanner* terrestre. Os pontos chave para avaliação foram a identificação de: dados incompletos (DI) onde buscou-se avaliar se houve um recobrimento total do fuste por pontos *laser* em determinadas alturas; vento (V) avaliou-se a ocorrência ou não; influência da copa (IC) checkou-se para algumas alturas se existia influência da copa nos resultados da filtragem; filtragem (F) determinou-se se foi bem realizada.

Essa avaliação permite encontrar algumas explicações sobre a qualidade dos resultados de variáveis dendrométricas derivadas dessas nuvens de pontos.

3.6.5 Avaliação das alturas totais

Os resultados de altura total obtidos com o *laser* pelas varreduras simples e múltiplas foram confrontados com o valor paramétrico obtido com trena após a derrubada da árvore e com o valor do hipsômetro Vertex III.

A primeira avaliação foi um simples cálculo de erros da varredura simples, múltipla e Vertex III em relação ao valor paramétrico da trena. Com base nestes erros esquematizaram-se tabelas e gráficos da distribuição destes buscando identificar a magnitude e a tendência dos resultados quanto à superestimativas ou subestimativas.

A segunda avaliação foi o teste estatístico de *Bartlett* para identificar se as variâncias dos métodos estudados eram homogêneas. Desta forma, torna-se possível avaliar a aplicabilidade ou não da análise de variância.

A estratégia adotada foi tratar o experimento como um delineamento inteiramente ao acaso. Visto que a variância entre as alturas das árvores era bastante pequena.

A terceira avaliação foi a aplicação do teste de *Tukey* para identificar se existem diferenças estatísticas entre os resultados de varreduras simples, múltiplas, hipsômetro e parâmetro (trena).

3.6.6 Avaliação dos diâmetros e áreas transversais

A avaliação de diâmetros e áreas transversais foi dividida em duas partes. A primeira compara os dados *laser*, dados tradicionais e área da fatia classificada (valor paramétrico). A segunda parte compara os diâmetros e áreas transversais obtidos com o *laser* com os valores de suta e fita métrica em alturas percentuais em relação a altura total das árvores.

3.6.6.1 Comparação com valores paramétricos

O parâmetro para a avaliação da qualidade dos resultados de diâmetros e áreas transversais foi a área da fotografia digital classificada. Para tal, os valores de diâmetros tanto das medidas tradicionais quanto dos métodos *laser* que resultam em diâmetro (DM e CO) foram convertidos em áreas utilizando a fórmula da área da circunferência.

Em função de as árvores possuírem valores um tanto quando diferentes de DAP foi feita uma divisão em duas classes de diâmetros. Cada uma dessas classes compôs um bloco no delineamento em blocos ao acaso. A divisão dos blocos é apresentada no QUADRO 5. Pode-se perceber que o bloco 1 possui as árvores com maiores diâmetros, os quais em alguns casos chegam a ser o dobro do valor das árvores do bloco 2. Portanto, esta divisão permite diminuir a variância dos dados tornando a análise mais coerente.

Divisão dos Blocos				
Árvores	BLOCO 1		BLOCO 2	
		DAP		DAP
	1	18	2	14
	6	15,5	3	9,6
	7	18	4	12
	10	17,5	5	11,1
	11	15,7	8	12,4
	12	17,2	9	10,5

QUADRO 5: DIVISÃO DOS BLOCOS SEGUINDO CLASSES DE DAP.
FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

Com essa divisão foi realizado o teste de *Bartlett* para identificar se as variâncias eram homogêneas e se era possível a aplicação da análise de variância e do teste de *Tukey*.

O próximo passo foi a realização do teste de *Tukey* identificando se os resultados do *laser*, suta e fita eram iguais aos valores paramétricos. Para tal, houve uma avaliação dos blocos (buscando analisar se existiam diferenças entre os blocos) e uma avaliação dos resultados dentro de cada bloco.

Além dessas análises estatísticas elaboram-se tabelas de erros e gráfico de erros.

3.6.6.2 Análise das fatias em percentuais da altura total das árvores

Esta análise busca identificar a existência de diferenças entre as medidas de diâmetros e áreas transversais em relação à posição da altura da árvore em que essas se encontram.

O procedimento foi semelhante ao abordado na análise dos valores paramétricos, no entanto, houve diferenciações conforme a árvore e a altura em que se encontrava a fatia. Isto se deve a que alguns métodos foram muito ineficientes na determinação de diâmetros e áreas transversais nas partes mais altas da árvore e mais especificamente em algumas árvores. Esses métodos e/ou árvores necessitaram ser eliminados para que houvesse homogeneidade na variância e fosse factível realizar a análise de variância e o teste de *Tukey*. Esta foi a forma encontrada para analisar e compreender se os erros são do método em si ou se somente não funcionaram para algumas árvores.

O QUADRO 6 mostra como foi realizada a análise. Algumas fatias, como a fatia 15 %, foram analisadas duas vezes. Isto foi necessário, pois se tentou avaliar primeiramente o maior número de métodos. Para tal, as árvores que possuíam um ou mais métodos com erro maior que 50% foram eliminadas. À medida que a altura das fatias em relação à altura da árvore aumentava, um maior número de árvores precisava ser eliminado. Assim, é possível eliminar erros que não são oriundos do método em si, mas sim de um problema específico com a fatia na altura analisada para uma determinada árvore. A segunda avaliação tentou manter uma maior quantidade de árvores eliminando desta forma os piores métodos (aqueles que geram erros grosseiros maiores que 50%). Desta forma, é possível contabilizar se os métodos têm um comportamento homogêneo ao longo do fuste ou se à medida que a altura aumenta os resultados pioram sistematicamente.

FATIA	ÁRVORES												MÉTODOS							DELINEAMENTO
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	MDM	MCO	MAL	MALM	SDM	SCO	SALM	
5%	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	BLOCOS AO ACASO
15% (1)	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
15% (2)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	
25% (1)		X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
25% (2)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	
35% (1)	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X				
35% (2)	X	X			X	X		X	X	X				X	X	X	X	X	X	
45%		X		X		X	X	X	X		X			X	X	X	X	X	X	
55%		X		X	X		X	X					X	X	X	X	X	X	X	INTEIRAMENTE AO ACASO
65%		X	X	X		X		X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	
75%	NÃO REALIZADO - BAIXA QUALIDADE																			-
85%	NÃO REALIZADO - BAIXA QUALIDADE																			-
95%	NÃO REALIZADO - BAIXA QUALIDADE																			-

MDM – Múltipla Distância Máxima; MCO – Múltipla Circunferência Ótima; MAL – Múltipla Área Laser; MALM – Múltipla Área Laser Modificado; SDM – Simples Distância Máxima; SCO – Simples Circunferência Ótima; SALM – Simples Área Laser Modificado.

QUADRO 6: FORMA DE ANÁLISE DAS FATIAS PARA O TESTE DE *TUKEY*.

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

3.6.7 Análise dos volumes

Os volumes das três primeiras toras de 1 metro foram analisados contra o valor paramétrico obtido com o xilômetro. Para cada tora os volumes foram calculados pelos métodos de *Smalian*, *Huber* e *Newton* utilizando o melhor método de obtenção de área transversal de varredura simples e múltipla bem como os valores obtidos pela suta e pela fita.

Para cada tora foi realizado o teste de *Bartlett* para avaliar se as variâncias eram homogêneas para aplicação da análise de variância e teste de *Tukey*. Buscando diminuir a variação utilizou-se um delineamento em blocos ao acaso com 2 blocos compostos pelas árvores conforme anteriormente apresentado no QUADRO 5.

Após o teste de *Bartlett* realizou-se o teste de *Tukey* para determinar se existem diferenças estatísticas entre os volumes calculados com os dados *laser*, os volumes obtidos com o xilômetro e com as medidas tradicionais: suta e fita. Além disso, o teste possibilita identificar se existem diferenças significativas entre as médias dos métodos de cubagem (*Smalian*, *Huber* e *Newton*) servindo como indicador na escolha do melhor método para cubagem com o *laser*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são apresentados e discutidos os resultados dendrométricos obtidos pelo processamento *laser*. É feita uma comparação detalhada dos resultados *laser* com aqueles das medidas tradicionais coletadas em campo e com os valores paramétricos de cada variável. Abordam-se as vantagens e desvantagem do processamento *laser* por varredura simples e por varredura múltipla.

A TABELA 2 apresenta a descrição básica dos parâmetros dendrométricos das árvores de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* analisadas. Portanto, todos os resultados e inferências realizados estão baseados unicamente nesta amostra populacional.

TABELA 2: ESTATÍSTICAS DA POPULAÇÃO ANALISADA

Árvore	DAP (suta) (cm)	Ht (m)
1	17,65	15,2
2	14,4	14,1
3	9,85	11
4	12,1	14,1
5	11,55	14,3
6	15,45	14,1
7	17,9	17,7
8	12,45	12,4
9	10,15	14,5
10	18	15,3
11	15,55	14,1
12	17,7	15,2
Máximo	18,00	17,70
Mínimo	9,85	11
Média	14,40	14,33
Desvio Padrão	3,09	1,62

4.1 PROGRAMA DENDROLASER

O programa DENDROLASER foi o *software* desenvolvido para o processamento dos dados desta dissertação. Possui as rotinas de cálculo de cada um dos métodos apresentados para altura total, diâmetros, áreas transversais e

volumes. Fica disponível para o Laboratório de Geoprocessamento do curso de Engenharia Florestal para melhorias e criação de novas rotinas em estudos futuros. A FIGURA 23 apresenta os créditos do programa para contato de possíveis interessados.



FIGURA 23 – PÁGINA INICIAL DO PROGRAMA DENDROLASER.
FONTE: O Autor (2011).

4.2 FILTRAGEM DAS ÁRVORES

O processo de eliminação de pontos não pertencentes ao tronco é imprescindível para uma adequada modelagem das variáveis dendrométricas a partir de dados *laser scanner* terrestre.

A filtragem de cada uma das árvores foi realizada visualmente e de forma independente para varreduras simples e múltiplas conforme descrito na metodologia. Os resultados desta etapa foram avaliados somente de forma qualitativa buscando identificar possíveis problemas relativos à filtragem propriamente dita e a coleta de dados que pudessem influenciar negativamente nos resultados.

A FIGURA 24 exemplifica o processo de filtragem que foi utilizado no caso das varreduras múltiplas. O primeiro passo (1) foi identificar a árvore de interesse e isolá-la dos demais objetos (2). No segundo passo, eliminam-se os pontos de galhos, folhas, solo e demais pontos ruídos de objetos não identificados. Ao final, gerou-se um arquivo com somente os pontos do fuste de cada árvore (3).

O procedimento de filtragem das varreduras simples seguiu a mesma metodologia das varreduras múltiplas, porém, a filtragem visual torna-se relativamente mais fácil devido à menor quantidade de dados e maior facilidade para trabalhar em uma menor quantidade de planos no espaço tridimensional.

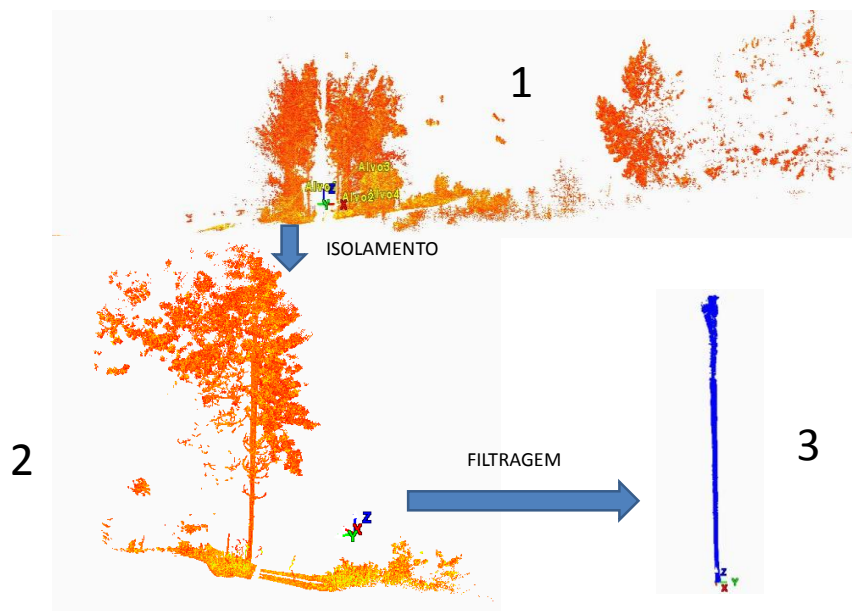


FIGURA 24 - RESULTADO DO ISOLAMENTO E FILTRAGEM DA ÁRVORE 3. EXEMPLIFICANDO O RESULTADO DAS DEMAIS ÁRVORES UTILIZANDO VARREDURA MÚLTIPLA OU SIMPLES. FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

Após a filtragem de cada uma das árvores por varredura simples e por varredura múltipla fez-se a avaliação da qualidade verificando possíveis problemas na nuvem de pontos. Esta análise é bastante importante, pois permite justificar algumas deficiências na obtenção de variáveis dendrométricas.

A FIGURA 25 apresenta alguns dos erros encontrados em duas árvores (árvores 3 e 7). Os principais problemas encontrados foram o deslocamento do eixo principal do fuste provocado pelo vento no momento da coleta de dados. Fato este que foi agravado nas árvores de menor diâmetro e principalmente nas árvores de bordadura da floresta onde a incidência de vento é maior como é o caso da árvore 3 (FIGURA 25). Neste caso, houve problemas de deslocamento da nuvem de pontos a partir de 3 m de altura. No exemplo da árvore 7 existiu influência do vento nos resultados, mas somente para alturas próximas a altura total da árvore.

Outro exemplo de problema identificado e que gera erros grosseiros ou a ausência de resultados para determinadas alturas das árvores diz respeito à baixa amostragem de pontos do fuste a partir do momento em que se inicia a copa das árvores. Neste caso, a maioria dos pontos captados pelo *laser scanner* terrestre faz

parte da copa (galhos e acículas). Os pontos que retornam do fuste estão em pequena quantidade inviabilizando a modelagem de diâmetros e áreas transversais. Este exemplo é demonstrado na FIGURA 26 e ocorre tanto para as varreduras simples quanto para as varreduras múltiplas.

Os problemas demonstrados nas FIGURA 25 e 26 são em uma perspectiva vertical do tronco da árvore. Estes mesmos erros podem ser identificados, muitas vezes até mais facilmente, em cortes horizontais em alturas pré-determinadas (FIGURA 27).

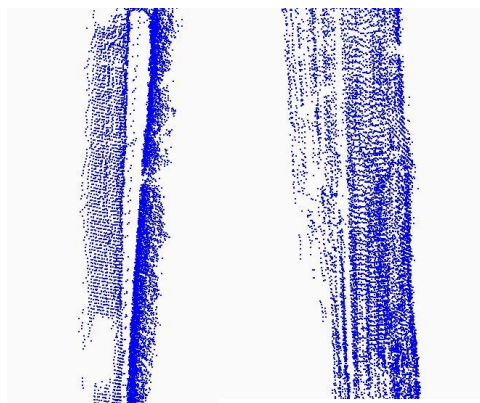


FIGURA 25 - IDENTIFICAÇÃO DE PROBLEMAS OCACIONADOS PELO VENTO. EXEMPLOS DA ÁRVORE 3 À ESQUERDA E ÁRVORE 7 À DIREITA.
FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

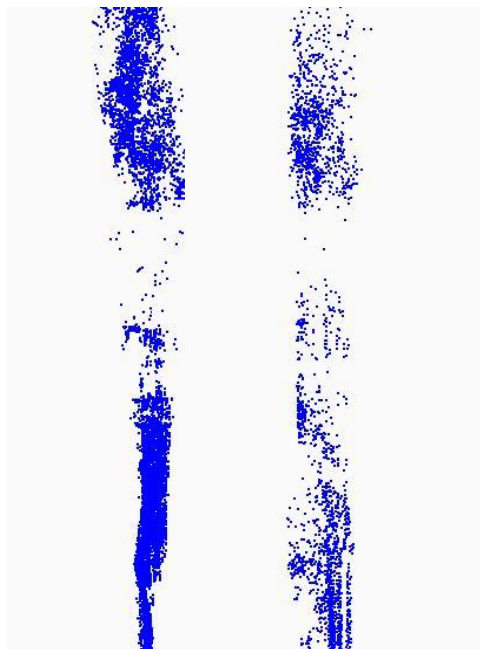


FIGURA 26 - EFEITO DA COPA GERANDO BAIXA DENSIDADE DE PONTOS NAS PARTES SUPERIORES DO FUSTE. ÁRVORE 6 A ESQUERDA E 11 A DIREITA.
FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

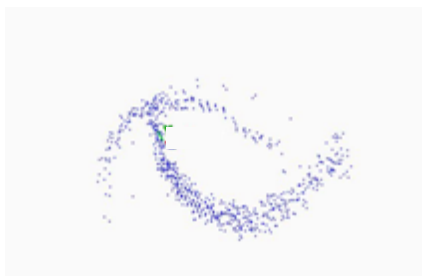


FIGURA 27 - DETALHE DE FATIA COM EFEITO DO VENTO.
 FONTE: Elaborado pelo Autor (2011)

Finalmente, elaborou-se a FIGURA 28 contendo os principais problemas ocorridos, na base das árvores (altura zero até 0,5 m), nas proximidades do 1,3 m, 2,3 m e 3,3 m, nos 50% da altura total e nos 75% da altura total. Para cada uma dessas alturas avaliaram-se:

- a) Filtragem: Existência de pontos não filtrados (1); Filtragem ok (0)
- b) Dados incompletos: Faltam informações na altura avaliada (1); Não Faltam informações (0)
- c) Vento: Foi detectado problemas na nuvem de pontos devido a vento (1); Não foram detectados problemas (0).
- d) Interferência de Copa: Foram identificados problemas pela ocorrência da copa (galhos, folhas e poucos pontos do fuste)? Sim (1); Não (0)

Identificação dos principais problemas das árvores filtradas - varredura simples																				
Árvore	F 1,3	F 2,3	DI 1,3	DI 2,3	DI 3,3	V 1,3	V 2,3	V 3,3	V 50% ht	V 75% ht	F 3,3	DI BASE	DI 50% ht	F 50% ht	DI 75% ht	F 75% ht	F BASE	IC 50% ht	IC 75% ht	SOMA
1													1		1			1	1	4
2														1		1	1	1	1	5
3														1		1	1	1	1	5
4												1			1		1	1	1	5
5															1	1	1	1	1	5
6														1	1	1	1	1	1	6
7														1	1	1	1	1	1	6
8														1		1	1	1	1	6
9														1	1	1	1	1	1	6
10														1	1	1	1	1	1	7
11														1	1	1	1	1	1	7
12														1	1	1	1	1	1	7
SOMA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	4	9	9	10	11	12	12	

Legenda

F - Filtragem DI - Dados Incompletos V - Vento IC - Influência da Copa

Identificação dos principais problemas das árvores filtradas - varredura múltipla																				
Árvore	F 1,3	F 2,3	DI 1,3	DI 2,3	DI 3,3	V 1,3	F 3,3	V 2,3	V 3,3	DI BASE	DI 50% ht	V 50% ht	V 75% ht	F 50% ht	F 75% ht	DI 75% ht	IC 50% ht	IC 75% ht	SOMA	
6															1	1	1	1	5	
11														1		1	1	1	5	
2				1	1						1				1	1	1	1	6	
5				1	1										1		1	1	6	
4											1				1		1	1	6	
7													1	1		1	1	1	6	
8											1				1	1	1	1	6	
10							1					1		1		1	1	1	7	
9							1						1	1	1	1	1	1	8	
1				1	1	1								1	1	1	1	1	9	
12				1	1	1					1			1	1	1	1	1	11	
3				1	1	1		1	1		1	1		1	1	1	1	1	12	
SOMA	0	0	5	5	3	0	2	1	1	3	3	4	4	7	8	9	10	11	11	

BOM 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 RUIM

BOM 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 RUIM

FIGURA 28 - QUALIFICAÇÃO DOS ERROS ENCONTRADOS NA FILTRAGEM PARA VARREDURA SIMPLES E MÚLTIPLA.

⁴FONTE: Elaborado pelo autor (2011) e por Buck (2011)

Esta análise permite elencar uma classificação das árvores em função da qualidade de dados e também, identificar quais são os pontos críticos que geralmente causam problemas em todas as árvores. O primeiro caso pode ser identificado na soma de linhas e o segundo caso a identificação é realizada na soma de colunas da FIGURA 28 tanto para varredura simples quanto múltipla.

Pode-se concluir que a influência da copa a partir do seu adensamento (50% da altura total das árvores para o conjunto analisado) é uma tendência global. A filtragem das bases das árvores é complicada necessitando melhorias futuras e automatização dos procedimentos. A qualidade da filtragem a partir do início da copa é deficiente. O vento causa influência somente em algumas árvores. As porções medianas das árvores (valores entre a base e a copa) apresentam, em

⁴ Buck, André Leonardo Bortolotto. Mestrando do Curso de Pós Graduação em Engenharia Florestal, UFPR – 2011.

geral, boa qualidade de dados, no entanto, em varreduras múltiplas os dados incompletos podem ser um problema.

4.3 OBTENÇÃO DE ALTURAS

Os valores de altura total das árvores foram determinados tanto para varreduras múltiplas como para varreduras simples com *laser scanner* terrestre. Esses valores foram comparados com os resultados do equipamento *Vertex III*, considerado como medida tradicional desta variável dendrométrica, e com o valor paramétrico (Referência) que foi a altura total medida com trena após o abate das árvores.

Após o processamento *laser* para obtenção de alturas totais chegou-se aos resultados apresentados na TABELA 3. Inicialmente buscou-se apresentar esses resultados ordenados de forma ascendente em relação às alturas. Porém, como se percebeu que não existem, para o conjunto de dados, tendências diferenciadas em relação às alturas optou-se por apresentar os resultados por ordem ascendente pelo número da árvore.

TABELA 3 - RESULTADOS PARA ALTURA TOTAL DAS ÁRVORES.

Árvore	Referência	Vertex	Varredura simples	Varredura múltipla
1	15,50	15,20	15,58*	15,44
2	14,70	14,10	14,23	14,14
3	12,80	11,00	13,05*	13,08*
4	14,40	14,10	14,20	14,24
5	13,80	14,30	13,18	13,31
6	14,10	14,10	14,04	13,94
7	17,14	17,7*	17,09	17,10
8	12,60	12,40	12,63*	12,66*
9	14,20	14,5*	14,06	14,08
10	16,00	15,30	14,85	15,39
11	13,90	14,1*	13,84	14,19
12	15,30	15,20	15,28	15,26

Obs: Valores em metros; * valores superestimados

FONTE: O Autor (2011).

Pode-se notar que os valores do hipsômetro *Vertex III* e os métodos *laser* estão bastante próximos aos valores paramétricos obtidos com trena no momento da derrubada das árvores. Para que se torne mais claro os erros de cada método em relação ao valor paramétrico (medida da trena após a derrubada das árvores) elaborou-se a TABELA 4 onde são apresentados os erros em valores absolutos e em valores relativos.

TABELA 4 - ERROS ABSOLUTOS E RELATIVOS DOS MÉTODOS TESTADOS EM RELAÇÃO AO VALOR PARAMÉTRICO MEDIDO COM TRENA APÓS DERRUBADA DA ÁRVORE

Árvore	Erros Absolutos (m)			Erros Relativos (%)		
	Vertex	Varredura simples	Varredura múltipla	Vertex	Varredura simples	Varredura múltipla
1	0,30	-0,08	0,06	1,94	-0,55	0,36
2	0,60	0,47	0,56	4,08	3,16	3,78
3	1,80	-0,25	-0,28	14,06	-1,93	-2,20
4	0,30	0,20	0,16	2,08	1,42	1,12
5	-0,50	0,62	0,49	-3,62	4,51	3,56
6	0,00	0,06	0,16	0,00	0,42	1,14
7	-0,56	0,05	0,04	-3,27	0,28	0,21
8	0,20	-0,03	-0,06	1,59	-0,24	-0,44
9	-0,30	0,14	0,12	-2,11	1,00	0,82
10	0,70	1,15	0,61	4,38	7,21	3,82
11	-0,20	0,06	-0,29	-1,44	0,44	-2,11
12	0,10	0,02	0,04	0,65	0,13	0,29
Média	0,20	0,20	0,13	1,53	1,32	0,86
Erro padrão da média	0,18	0,11	0,08	1,37	0,72	0,59

Sendo o erro considerado como o valor paramétrico menos o valor estimado pelos outros métodos tem-se que um sinal negativo corresponde a uma superestimação do método em relação ao valor real. No caso de um sinal positivo tem-se que o método subestimou o valor real. Desta forma, pode-se analisar que em média o *Vertex III* resulta 20 cm a menos que o valor real de altura total da árvore com um erro padrão da média de +- 18 cm. A varredura simples subestima a altura total em 20 cm na média, porém com uma amplitude de variação um pouco menor, representada por um erro padrão da média de +- 11 cm. Por fim, tem-se o melhor resultado quando se aplica o método de determinação da altura total com varredura múltipla. Neste caso, existe uma subestimação de em média 13 cm em relação à altura paramétrica com um erro padrão da média de apenas 8 cm. Vale destacar a árvore 3 em que o erro da medição do *Vertex III* foi elevado, erros desta magnitude

costumam ser originados pelo operador que, por uma má visualização da copa ou por descuido na medição, acaba cometendo erros grosseiros. Este fato não é notado com dados *laser scanner* terrestre onde a subjetividade do operador acaba sendo eliminada. Na FIGURA 29 pode-se observar a distribuição dos erros os quais se concentram acima da linha de 0% de erro, comprovando a tendência de subestimativa.

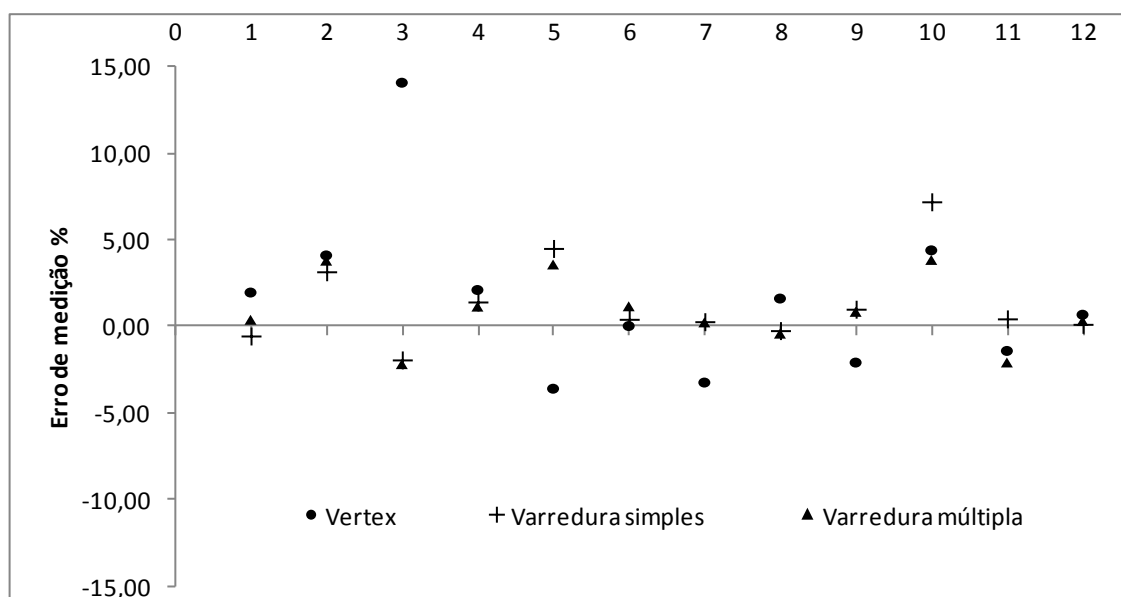


FIGURA 29 - DISTRIBUIÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE ALTURA TOTAL EM RELAÇÃO AO VALOR PARAMÉTRICO DA TRENA (REFERÊNCIA) APÓS A DERRUBADA DA ÁRVORE.
Fonte: O Autor (2011).

Embora os valores obtidos pelo processamento *laser* sejam extremamente próximos aos obtidos pelo valor paramétrico da trena (referência) mantém-se o questionamento de que os métodos de processamento dos dados *laser* tendem a subestimar o valor da altura independentemente da espécie avaliada conforme já relatado por diversos autores como Lingnau *et al.* (2010) e Silva *et al.* (2011) com medições em *Pinus*, Hopkinson *et al.* (2004) em povoamentos de *Pinus resinosa* e misto de espécies decíduas e Wezyk *et al.* (2007) em povoamentos de Oak (*Quercus* sp.) e Beech (*Fagus sylvatica*). Os erros podem ser atribuídos a alta densidade de copa e ao mau posicionamento do equipamento (LINGNAU *et al.*, 2010), a uma baixa densidade amostral de pontos no dossel superior devido a presença de copas no campo de visada do *laser* (HOPKINSON *et al.*, 2004), e ao fato de os pequenos galhos da copa não serem claramente identificados pela varredura *laser* ao se trabalhar com espécies decíduas (WEZYK *et al.*, 2007).

Nesta pesquisa, os erros em altura foram pequenos, porém é sabido que a magnitude destes pode ser bem maior dependendo do conjunto de dados estudado. Embora, vários autores (HOPKINSON *et al.*, 2004; WEZYK *et al.*, 2007; LINGNAU *et al.*, 2010 e SILVA *et al.*, 2011) tenham citado a existência de sub-estimativas nas alturas totais das árvores nenhum estudo concreto, detalhando a influência desses fatores citados, foi realizado para que sejam conhecidas as reais causas e magnitudes destes erros.

A última análise realizada com as alturas determinadas por esses diferentes métodos foi comparar estatisticamente pelo teste de *Tukey* ao nível de 5% de significância. A aplicação do teste permite concluir se todos os métodos são iguais entre si a 95 % de probabilidade. Como o pré-requisito para realizar o teste é a análise de variância torna-se imprescindível a aplicação de um teste de homogeneidade das variâncias. Neste caso, aplicou-se o teste de *Bartlett* onde a hipótese de que as variâncias são homogêneas foi aceita. Procedeu-se então com a análise de variância e o teste de *Tukey* propriamente dito. Conforme podemos observar na TABELA 5 não existem diferenças estatísticas entre os métodos aplicados.

TABELA 5 - RESULTADOS DO TESTE DE *TUKEY* A 5% PARA AS ALTURAS TOTAIS DAS ÁRVORES OBTIDAS POR DIFERENTES MÉTODOS.

Altura	Média (m)	Resultado
		<i>Tukey</i>
Referência	14,54	A1
Vertex III	14,33	A1
Varredura simples	14,34	A1
Varredura múltipla	14,4	A1

FONTE: O Autor (2011).

Cabe ressaltar, que neste conjunto de dados utilizado, as 12 árvores apresentaram boa visualização da base junto ao solo e do topo das copas em cada uma das bases de instalação do equipamento *laser* para varredura simples. Em casos onde de um mesmo ponto de instalação do equipamento *laser* não seja

possível a visualização da base da árvore e do topo de sua copa, o método de varredura simples não proporcionará bons resultados.

Para alturas totais de árvores fica comprovada a hipótese de que medidas tradicionais e *laser*, obtidas tanto por varreduras simples como múltiplas, desde que a visualização da copa seja possível geram resultados estatisticamente iguais.

4.4 OBTENÇÃO DE DIÂMETROS E SEÇÕES TRANSVERSAIS

Os diâmetros e seções transversais foram calculados pelos quatro métodos propostos para varredura múltipla (MDM, MCO, MAL e MALM) com *laser scanner* terrestre e pelos três métodos propostos para varredura simples (SDM, SCO e SALM). Além das medições nas alturas pré-determinadas na metodologia o programa DENDROLASER realizou o cálculo de diâmetros e seções transversais de fatias eqüidistantes em 10 cm desde a base até o topo das árvores.

4.4.1 Análise comparativa - valores paramétricos

Buscou-se saber o quão precisos foram os métodos de medição de diâmetros e áreas transversais das 12 árvores selecionadas para o estudo.

Sendo a área transversal o fator base para cálculo do volume de uma árvore, o parâmetro para comparar tanto os resultados de diâmetros, quanto de áreas transversais, foi a área das fatias fotografadas e classificadas digitalmente. Desta forma, todos os valores de diâmetros (suta, fita e os métodos de Distância Máxima e Circunferência Ótima) foram convertidos para área utilizando a equação da área de uma circunferência.

É importante destacar que o estudo tenta responder quais são as diferenças entre os resultados de varredura simples e de varredura múltipla e se essas diferenças são estatisticamente significantes entre si e entre os valores das medidas tradicionais. Portanto, foram confrontados diretamente os valores obtidos por meio das varreduras simples e múltiplas (MDM, MCO, MAL, MALM, SDM, SCO, SALM)

com os valores medidos com suta, fita métrica e fotografia classificada (valor paramétrico - referência).

As estatísticas utilizadas foram o teste de *Bartlett* para verificar se as variâncias dos tratamentos são homogêneas e o teste de *Tukey* para compreender se existem diferenças estatísticas entre as médias dos tratamentos. Inicialmente todas as árvores foram agrupadas em um único conjunto de dados como um experimento inteiramente ao acaso. Porém, notou-se que desta forma a variância era muito alta e os resultados poderiam expressar erroneamente a realidade. Por esta razão, as árvores foram divididas em duas classes de diâmetro com base em seus DAP. Com essas classes a forma de análise dos dados passou a ser em blocos ao acaso compreendendo 2 blocos (árvores de maior e menor diâmetro), 10 tratamentos (suta, fita métrica, fotografia digital e métodos *laser* de varredura simples e múltipla) com 12 repetições (árvores).

Os valores paramétricos das áreas transversais foram medidos somente nas alturas de 1,3; 2,3 e 3,3 metros. O teste de *Bartlett* apontou que não existem diferenças de homogeneidade ao nível de 5 % de significância.

Os resultados para do teste de *Tukey* para as fatias analisadas são apresentados nas TABELA 6 e TABELA 7. Pode-se observar que o método denominado de Distância Máxima para a varredura múltipla (MDM) apresentou resultados ruins sendo significativamente diferente do parâmetro da fotografia classificada no bloco 1 onde se encontram as árvores de maiores diâmetros. No entanto, para o segundo bloco (menores diâmetros) todos os métodos resultaram valores de médias iguais para um nível de significância de 5%. Isto demonstra que é necessário um cuidado maior quando se aplica o método de Distância Máxima para as varreduras múltiplas. O valor encontrado por este método acaba sendo muito alto e desta forma acaba diferindo estatisticamente dos demais métodos. Desta forma, não é recomendada a utilização do método MDM para a amplitude de dados de *Pinus* spp analisada.

TABELA 6 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TESTE DE *TUKEY* ($\alpha = 0,05$) PARA O BLOCO 1 ONDE ENCONTRAM-SE AS ÁRVORES DE MAIOR DIÂMETRO

ANÁLISE DO BLOCO 1						
REFERÊNCIA	FATIAS (M)					
	1,3		2,3		3,3	
	A1		A1		A1	
SUTA	A1	A2	A1		A1	
FITA	A1	A2	A1		A1	
MAL	A1	A2	A1		A1	
MCO	A1	A2	A1	A2	A1	
MALM	A1	A2	A1	A2	A1	
SCO	A1	A2	A1		A1	
SALM	A1	A2	A1		A1	
SDM	A1	A2	A1	A2	A1	A2
MDM		A2		A2		A2

Teste de Tukey para 95% de probabilidade

Métodos com mesma codificação de letras são estatisticamente iguais

MDM – Múltipla Distância Máxima; MCO – Múltipla Circunferência Ótima; MAL – Múltipla Área *Laser*; MALM – Múltipla Área *Laser* Modificado; SDM – Simples Distância Máxima; SCO – Simples Circunferência Ótima; SALM – Simples Área *Laser* Modificado.

FONTE: O Autor (2011).

TABELA 7 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO TESTE DE *TUKEY* ($\alpha = 0,05$) PARA O BLOCO 2 ONDE ENCONTRAM-SE AS ÁRVORES DE MENOR DIÂMETRO.

ANÁLISE DO BLOCO 2						
REFERÊNCIA	FATIAS (M)					
	1,3		2,3		3,3	
	A1		A1		A1	
SUTA	A1		A1		A1	
FITA	A1		A1		A1	
MAL	A1		A1		A1	
MCO	A1		A1		A1	
MALM	A1		A1		A1	
SCO	A1		A1		A1	
SALM	A1		A1		A1	
SDM	A1		A1		A1	
MDM	A1		A1		A1	

Teste de Tukey para 95% de probabilidade

Métodos com mesma codificação de letras são estatisticamente iguais

MDM – Múltipla Distância Máxima; MCO – Múltipla Circunferência Ótima; MAL – Múltipla Área *Laser*; MALM – Múltipla Área *Laser* Modificado; SDM – Simples Distância Máxima; SCO – Simples Circunferência Ótima; SALM – Simples Área *Laser* Modificado.

FONTE: O Autor (2011).

Além dos testes estatísticos, buscou-se ver a magnitude dos erros encontrados em cada árvore para área transversal das fatias 1,3 (TABELA 8), 2,3 (TABELA 9) e 3,3 m (TABELA 10). Como numericamente é difícil compreender

quanto representa em valor absoluto uma diferença de área de uma fatia extremamente pequena, realizou-se a análise por meio de valores percentuais. Para tal, utilizou-se o valor da fotografia classificada como valor verdade e calcularam-se os erros percentuais. Neste caso, os valores que apresentam sinal negativo correspondem a uma superestimação do valor real de área transversal.

TABELA 8: ERROS DOS MÉTODOS EM RELAÇÃO AO VALOR PARAMÉTRICO PARA FATIA 1,3 m. DADOS ORDENADOS DE FORMA ASCENDENTE SEGUINDO O MÉTODO MAL.

Fatia 1,3 m (% de erro)									
ARV	Varredura Múltipla				Varredura Simples			Suta	Fita
	MDM	MCO	MAL	MALM	SDM	SCO	SALM		
5	-63,2	-23,1	-15,6	-21,1	-17,5	-0,2	-0,5	-5,0	-7,1
1	-34,6	-9,0	-8,8	-8,8	-24,4	-13,3	-13,4	-21,5	-6,2
12	-26,0	-9,6	-8,0	-9,8	-9,5	5,9	5,8	-10,6	-5,6
9	-31,2	-6,9	-7,8	-7,6	-14,1	-0,7	0,1	-23,2	-2,1
2	-41,5	-8,7	-7,7	-8,5	-25,1	-12,2	-12,0	-10,8	-6,2
6	-31,5	-7,3	-6,3	-6,7	-5,8	-3,4	-3,5	-9,4	-3,3
11	-28,8	-5,6	-6,1	-6,0	-20,2	-18,1	-17,9	-17,0	-4,6
8	-27,3	-3,9	-6,0	-5,2	-14,0	-13,5	-13,8	-6,1	-3,0
10	-25,7	-5,6	-5,7	-5,8	-16,5	-12,3	-12,2	-10,1	-4,0
4	-44,7	-0,4	-1,5	-1,2	-19,4	-19,9	-19,9	-11,3	-5,7
7	-29,6	-0,5	-0,1	0,1	-4,9	2,1	1,7	-19,3	-4,5
3	-30,0	11,2	9,5	10,8	-22,0	-3,1	-3,0	-1,9	-2,6
MÉDIA	-34,5	-5,8	-5,3	-5,8	-16,1	-7,4	-7,4	-12,2	-4,6
Desvio padrão	10,8	7,9	6,0	7,4	6,7	8,5	8,4	6,7	1,6
Erro padrão da média	3,1	2,3	1,7	2,1	1,9	2,4	2,4	1,9	0,5

MDM – Múltipla Distância Máxima; MCO – Múltipla Circunferência Ótima; MAL – Múltipla Área Laser; MALM – Múltipla Área Laser Modificado; SDM – Simples Distância Máxima; SCO – Simples Circunferência Ótima; SALM – Simples Área Laser Modificado.

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

Na TABELA 8 encontram-se os erros de cada um dos métodos analisados na fatia a 1,3 m a partir do solo. As árvores foram classificadas de acordo com os erros do melhor método *laser* (MAL). Esta classificação permite assumir que, as árvores com piores resultados, encontram-se nos limites superior e inferior da Tabela (Árvore 5 e 3). Para justificar esses erros pode-se observar a FIGURA 28 apresentada anteriormente nos resultados da filtragem. As árvores em que os erros foram maiores para o método MAL possuíam suas fatias a 1,3 m com dados incompletos, ou seja, essas fatias não foram recobertas em seu perímetro total por pontos *laser*. Fato este que provavelmente ocasionou erros nas medições do método MAL.

As duas melhores árvores para fatia 1,3 m foram a árvore 4 e 7. Para essas, o resultados do *laser* (MAL) foram melhores que os resultados da suta e da fita. Conforme apresentado na FIGURA 30 essas fatias possuem uma forma bastante diferenciada de uma circunferência. Desta forma, é possível afirmar que a varredura *laser scanner* terrestre consegue captar mais precisamente as formas das fatias, sendo uma grande vantagem a aplicação desta tecnologia em árvores que tenham formato bastante irregular.

Para essas fatias os métodos de processamento *laser* MAL e MALM que buscam uma representação mais real da forma das árvores levam ligeira vantagem em relação aos demais métodos *laser* (MDM, MCO, SDM, SCO, SALM) e medidas tradicionais. Para varredura simples o método SALM apresenta bons resultados, porém existe uma menor confiabilidade no resultado final expresso por um maior desvio padrão e erro padrão da média, pois a quantidade menor de pontos deste modelo de coleta de dados pode influenciar negativamente sobre o resultado final de área transversal.

Quanto à análise global da TABELA 8, com exceção do método de Distância Máxima, tanto para varredura simples quanto para múltipla os erros médios apresentados pelos métodos *laser* foram menores que os apresentados pela suta. Estatisticamente o método Distância Máxima somente difere dos demais métodos quando aplicado em varredura múltipla. No entanto, esta análise permite verificar que também para varreduras simples os resultados são inferiores as medidas de suta. Percebe-se também uma tendência geral para todos os métodos e medidas analisados. Os valores de área transversal calculados sistematicamente superestimam as medidas.

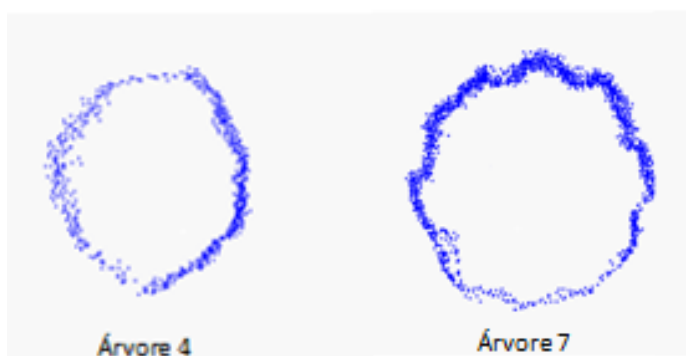


FIGURA 30 - FORMATO DA NUVEM DE PONTOS A 1,3 M DA ÁRVORE 4 E 7.
FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

O método de Distância Máxima apresenta piores resultados para Varredura Múltipla (MDM) que para Varredura Simples (SDM). No caso do MDM existe uma quantidade maior de combinações de pontos que o algoritmo realiza o cálculo de distância encontrando, normalmente, uma distância superior a encontrada no SDM.

Para o ajuste do método de Circunferência Ótima o resultado de varredura múltipla (MCO), como era esperado, foi notadamente melhor que a varredura simples (SCO). Nas varreduras simples a quantidade de dados é praticamente a metade dos dados utilizados para a varredura múltipla. Além disso, os dados concentram-se em apenas um dos lados da possível circunferência. Em função disso, o centro ótimo calculado tem um posicionamento pior no SCO que no MCO e consequentemente o raio médio é melhor representado em MCO que em SCO.

Dos métodos de processamento *laser scanner* terrestre notadamente o que apresentou melhores resultados foi o Múltipla Área Laser (MAL), o qual busca se aproximar ao máximo da área transversal real das fatias utilizando dados de varredura múltipla. Para a varredura simples o método Área Laser Modificado (ALM) neste caso (SALM) apresentou os melhores resultados, embora tenha que estimar seguindo um valor de raio médio as partes onde não existem informações de pontos do *laser scanner*.

A TABELA 9 apresenta os erros para a fatia 2,3 m. Dos métodos de processamento *laser* testados novamente o MAL foi o melhor para varredura múltipla e o SALM o melhor para varredura simples confirmando a tendência e a qualidade destes métodos.

Houve um aumento geral de erros para os métodos *laser*, porém a sistemática manteve-se muito semelhante com a fatia 1,3 m. Novamente as árvores com menor erro para o método MAL (considerado melhor método) foram a 4 e 7 confirmando a hipótese de que o *laser* capta de melhor forma a área transversal de fatias irregulares quando comparado com métodos tradicionais. Embora, para a árvore 7 a suta tenha sido um pouco melhor que o método MAL, ao comparar o MAL com a fita vê-se a qualidade deste método quando comparado com as medidas tradicionais.

TABELA 9: ERROS DOS MÉTODOS EM RELAÇÃO AO VALOR PARAMÉTRICO PARA FATIA 2,3 m. DADOS ORDENADOS DE FORMA ASCENDENTE SEGUINDO O MÉTODO MAL.

Fatia 2,3 m (% de erro)									
ARV	Varredura Múltipla				Varredura Simples			Suta	Fita
	MDM	MCO	MAL	MALM	SDM	SCO	SALM		
6	-71,0	-23,5	-22,2	-22,4	-36,5	-11,8	-11,5	0,1	-6,4
5	-59,7	-20,8	-18,8	-20,1	-17,7	-15,1	-15,2	1,7	-4,3
1	-42,2	-15,3	-16,4	-15,9	-35,8	-35,4	-35,0	-1,4	-4,4
2	-64,8	-15,3	-14,0	-14,6	-15,3	-6,6	-6,6	2,3	-8,0
11	-37,9	-10,1	-9,7	-10,0	-27,4	-17,0	-17,1	-0,4	-5,4
9	-52,1	-7,0	-8,5	-8,5	-22,3	-14,8	-15,0	5,0	1,7
8	-26,0	-5,6	-6,1	-5,9	-19,7	-14,4	-14,1	5,9	-2,0
10	-40,6	-3,9	-4,6	-4,2	-15,9	-11,3	-10,8	0,1	-1,4
12	-33,4	-9,0	-3,8	-9,4	-14,6	9,5	9,9	0,7	-2,8
7	-35,5	-2,7	-2,4	-2,7	-10,9	16,3	16,5	-1,2	-7,2
4	-32,5	1,2	-1,5	-0,5	-29,8	-42,2	-42,3	2,8	-1,8
3	-61,9	12,0	17,0	11,8	-44,6	-24,1	-23,9	3,9	-3,5
MÉDIA	-46,5	-8,3	-7,6	-8,5	-24,2	-13,9	-13,7	1,6	-3,8
Desvio padrão	14,8	9,8	10,3	9,3	10,6	16,2	16,3	2,4	2,7
Erro padrão da média	4,3	2,8	3,0	2,7	3,0	4,7	4,7	0,7	0,8

MDM – Múltipla Distância Máxima; MCO – Múltipla Circunferência Ótima; MAL – Múltipla Área Laser; MALM – Múltipla Área Laser Modificado; SDM – Simples Distância Máxima; SCO – Simples Circunferência Ótima; SALM – Simples Área Laser Modificado.

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

Os métodos de Distância Máxima (MDM e SDM) apresentaram erros de grande magnitude e com alto desvio padrão. Em alguns casos este erro foi superior aos 70%. Isto demonstra que, embora estatisticamente não existam diferenças significativas entre as médias, os métodos de Distância Máxima tendem sempre a superestimar os valores de área transversal. Esses erros são em média 46,5% para o MDM e 24,2% para o SDM. Assim, não se recomenda o uso, principalmente nos casos de varredura múltipla onde se consegue informações com mais qualidade utilizando o método MAL.

Na fatia 2,3 m a árvore 3 tem um aumento em seu erro em todos os métodos de medição *laser*. Recorrendo-se a FIGURA 28, que apresenta os principais problemas da filtragem, podemos perceber que ocorre influência do vento já na altura de 2,3 m da árvore o que pode explicar esse aumento repentino dos erros.

Cabe destacar que as árvores possuem um diâmetro bastante pequeno conforme apresentado na TABELA 2. Por este motivo pequenas variações na área calculada acabam ocasionando um erro em percentagem um tanto quanto alto.

Para a fatia a 3,3 m os resultados são semelhantes aos anteriores. O melhor método para varredura múltipla se mantém (MAL) e o mesmo ocorre para varredura simples (SALM). No entanto, os erros para a árvore 3 aumentam em

relação a fatia 2,3 m. Fato explicado pela intensificação da influência do vento no momento da aquisição dos dados (FIGURA 31).

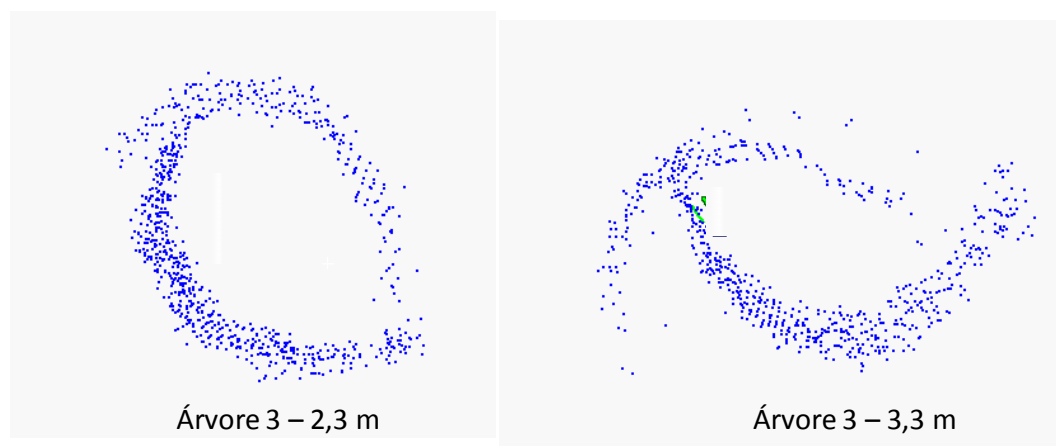


FIGURA 31 - INFLUÊNCIA DO VENTO EM DUAS FATIAS DA ÁRVORE 3
FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

TABELA 10: ERROS DOS MÉTODOS EM RELAÇÃO AO VALOR PARAMÉTRICO PARA FATIA 3,3 m. DADOS ORDENADOS DE FORMA ASCENDENTE SEGUINDO O MÉTODO MAL.

Fatia 3,3 m (% de erro)									
ARV	Varredura Múltipla				Varredura Simples			Suta	Fita
	MDM	MCO	MAL	MALM	SDM	SCO	SALM		
5	-60,1	-33,8	-29,6	-32,4	-33,8	-16,7	-16,9	-0,9	-3,3
6	-60,3	-23,9	-19,5	-22,3	-47,1	-17,2	-16,5	-0,9	-4,4
2	-45,5	-14,5	-13,5	-14,4	-12,6	0,3	-0,4	4,2	-2,7
11	-40,7	-12,1	-13,4	-12,7	-58,8	-40,6	-40,8	3,4	-3,4
1	-36,1	-11,1	-7,5	-10,8	-15,4	-3,1	-2,7	-2,0	-5,1
8	-31,3	-6,6	-6,7	-6,2	-12,0	-2,4	-2,7	2,9	-1,1
4	-48,6	-4,7	-4,6	-4,6	-27,3	-24,3	-24,1	5,0	-3,5
12	-32,4	-6,4	-3,9	-5,8	-23,5	-7,8	-7,4	1,6	-5,1
10	-38,0	-4,0	-3,2	-3,5	-25,6	-9,9	-9,0	1,7	-4,0
9	-61,5	-4,5	-2,3	-4,2	2,0	17,6	19,0	8,5	3,3
7	-36,5	4,2	4,3	4,4	-6,1	29,7	29,9	0,9	-4,4
3	-126,4	13,8	30,3	14,2	-55,7	-28,7	-28,5	4,7	-1,0
MÉDIA	-51,5	-8,6	-5,8	-8,2	-26,3	-8,6	-8,3	2,4	-2,9
Desvio padrão	26,0	12,3	14,5	11,9	19,4	19,4	19,5	3,0	2,4
Erro padrão da média	7,5	3,5	4,2	3,4	5,6	5,6	5,6	0,9	0,7

MDM – Múltipla Distância Máxima; MCO – Múltipla Circunferência Ótima; MAL – Múltipla Área Laser; MALM – Múltipla Área Laser Modificado; SDM – Simples Distância Máxima; SCO – Simples Circunferência Ótima; SALM – Simples Área Laser Modificado.

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

Finalmente, para facilitar a visualização dos erros em percentagem para as fatias 1,3; 2,3 e 3,3 m, elaborou-se FIGURA 32 onde são grafados os erros dos 2 melhores métodos laser para varredura múltipla e simples (MAL e SALM) confrontados com as medições tradicionais de suta e fita métrica. A linha zero de erro representa o valor paramétrico da fatia fotografada e classificada digitalmente.

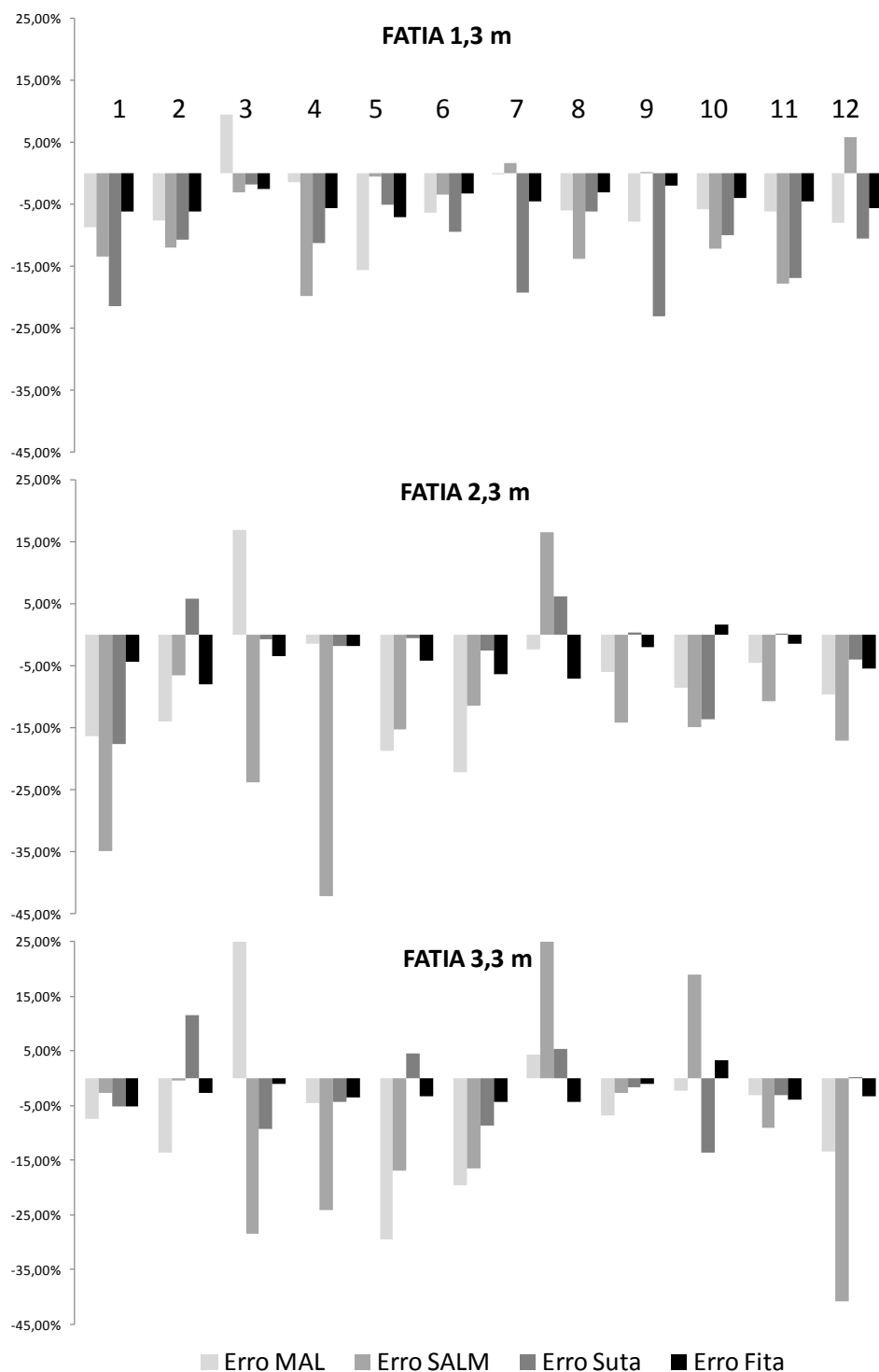
Nota-se o anteriormente abordado em relação à árvore 3, onde progressivamente a medida que aumenta a altura crescem os erros.

Com base na FIGURA 32 pode-se afirmar que existe uma tendência em superestimar os valores de área transversal. Porém, novos estudos devem ser realizados com uma maior variação de classes diamétricas para analisar se realmente existe esta tendência para um âmbito global ou se isto ocorre somente em árvores de pequeno porte.

Outra abordagem que a FIGURA 32 possibilita é a comparação entre o melhor método de varredura simples e múltipla. É perceptível que as medidas obtidas de varreduras múltiplas geralmente apresentam resultados mais precisos e estes se distribuem de uma forma mais homogênea para as árvores estudadas.

Embora não existam diferenças estatísticas entre o melhor método de processamento por varredura simples e múltipla em relação ao valor verdade (fotografias classificadas), em algumas ocasiões é recomendado o uso de varreduras múltiplas como é o caso da cubagem de árvores para o ajuste de funções volumétricas e de afilamento.

Uma comparação com a literatura existente torna-se pouco sustentada, pois nos trabalhos atualmente publicados (HOPKINSON *et al.* (2004); WEZYK *et al.* (2007); THIES E SPIECKER (2004); SIMONSE *et al.* (2003)) as medidas de área transversal e diâmetros são normalmente comparadas com as medidas da suta e não com valores reais de área transversal. Além disso, somente são consideradas as medidas a 1,3 m, as demais medidas não foram abordadas. Cabe destacar, que nas atuais publicações as análises são bastante simplificadas. Os autores costumam ajustar equações de regressão buscando explicar por meio do coeficiente de determinação (R^2) a qualidade das medições *laser*. Como são os casos de Hopkinson *et al.* (2004) que verificaram uma boa relação com a medida tradicional da suta expressa por um coeficiente de determinação alto ($R^2=0,85$) e Wezyk *et al.* (2007) com ajuste de R^2 de 0,94.



MAL – Múltipla Área Laser; SALM – Simples Área Laser Modificado.

FIGURA 32 - GRÁFICO DE ERROS DO MELHOR MÉTODO DE VARREDURA SIMPLES E MÚLTIPLA COMPARADOS COM MEDIDAS TRADICIONAIS EM RELAÇÃO AO VALOR PARAMÉTRICO DA IMAGEM DA FATIA CLASSIFICADA.

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

O único trabalho em que foram encontrados resultados de áreas transversais foi o de Király e Brolly (2010) que tratou a questão da determinação da área transversal por 4 diferentes métodos: “*Crescent moon*”, Polígonos de forma

livre (*Free Form Polygon* – FFP), ajuste de circunferência por mínimos quadrados e ajuste de cilindro por mínimos quadrados. O estudo apontou não existir diferenças significativas entre as estimativas obtidas pelos diferentes métodos, porém, os autores ressaltaram que os polígonos de forma livre retratam de forma mais perfeita a área da seção transversal. Comparativamente a este estudo, o trabalho em questão chegou a resultados similares, ou seja, também não houve diferenças estatísticas. No entanto, o diferencial, no presente estudo, é que ao contrário dos autores supracitados o valor considerado parâmetro foi a área da fatia classificada, enquanto no estudo destes autores o valor de parâmetro para as comparações foi o do algoritmo FFP que é similar ao processamento MAL deste trabalho.

Como as atuais publicações utilizam o diâmetro como valor de comparação para altura de 1,3 m, elaborou-se uma tabela em que todos os valores de área transversal foram transformados em valores de diâmetro por meio da aplicação reversa da fórmula da área da circunferência. A TABELA 11 apresenta esses resultados juntamente com as médias, desvios padrão e erros padrão para cada método *laser*, tradicional e valor paramétrico (Fotografia classificada).

TABELA 11: DIÂMETROS PARA CADA UM DOS MÉTODOS. O VALOR FOTO É O VALOR DA ÁREA DA FOTOGRAFIA DIGITAL CLASSIFICADA (PARÂMETRO) CONVERTIDO EM DIÂMETRO PELA EQUAÇÃO DA CIRCUNFERÊNCIA.

Valores de diâmetro obtidos por cada método (cm)										
Árvore	MDM	MCO	MAL	MALM	SDM	SCO	SALM	Suta	Fita	Foto
1	19,5	17,6	17,6	17,6	18,8	17,9	17,9	18,6	17,3	16,8
2	16,2	14,2	14,1	14,2	15,2	14,4	14,4	14,3	14,0	13,6
3	10,8	8,9	9,0	9,0	10,5	9,6	9,6	9,6	9,6	9,5
4	13,9	11,6	11,7	11,6	12,7	12,7	12,7	12,2	11,9	11,6
5	14,0	12,1	11,8	12,0	11,9	11,0	11,0	11,2	11,3	10,9
6	17,2	15,6	15,5	15,5	15,5	15,3	15,3	15,7	15,3	15,0
7	19,7	17,3	17,3	17,3	17,7	17,1	17,1	18,9	17,7	17,3
8	13,5	12,2	12,3	12,3	12,8	12,8	12,8	12,3	12,2	12,0
9	11,0	9,9	10,0	10,0	10,3	9,6	9,6	10,7	9,7	9,6
10	19,4	17,8	17,8	17,8	18,7	18,3	18,3	18,1	17,6	17,3
11	16,7	15,1	15,1	15,1	16,1	16,0	16,0	15,9	15,0	14,7
12	18,9	17,6	17,5	17,6	17,6	16,3	16,3	17,7	17,3	16,8
Média	15,9	14,2	14,1	14,2	14,8	14,2	14,3	14,6	14,1	13,8
Desvio Padrão	3,2	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,3	3,1	3,0
Erro Padrão	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9

MDM – Múltipla Distância Máxima; MCO – Múltipla Circunferência Ótima; MAL – Múltipla Área *Laser*; MALM – Múltipla Área *Laser* Modificado; SDM – Simples Distância Máxima; SCO – Simples Circunferência Ótima; SALM – Simples Área *Laser* Modificado.

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

Com base na TABELA 11 elaborou-se a TABELA 12 onde são apresentados os erros em valor absoluto de diâmetros em relação ao valor paramétrico do

diâmetro da fotografia classificada, obtidos por meio da fórmula da área da circunferência aplicada ao reverso.

TABELA 12: ERROS ABSOLUTOS DOS MÉTODOS *LASER* E TRADICIONAIS EM RELAÇÃO AO DIÂMETRO EXTRAÍDO DA FOTOGRAFIA DIGITAL.

Erro em diâmetro em relação ao valor paramétrico (cm)									
Árvore	MDM	MCO	MAL	MALM	SDM	SCO	SALM	Suta	Fita
1	-2,7	-0,7	-0,7	-0,7	-1,9	-1,1	-1,1	-1,7	-0,5
2	-2,6	-0,6	-0,5	-0,6	-1,6	-0,8	-0,8	-0,7	-0,4
3	-1,3	0,5	0,5	0,5	-1,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
4	-2,3	0,0	-0,1	-0,1	-1,1	-1,1	-1,1	-0,6	-0,3
5	-3,0	-1,2	-0,8	-1,1	-0,9	0,0	0,0	-0,3	-0,4
6	-2,2	-0,5	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,7	-0,2
7	-2,4	0,0	0,0	0,0	-0,4	0,2	0,2	-1,6	-0,4
8	-1,5	-0,2	-0,4	-0,3	-0,8	-0,8	-0,8	-0,4	-0,2
9	-1,4	-0,3	-0,4	-0,4	-0,7	0,0	0,0	-1,1	-0,1
10	-2,1	-0,5	-0,5	-0,5	-1,4	-1,0	-1,0	-0,8	-0,3
11	-2,0	-0,4	-0,4	-0,4	-1,4	-1,3	-1,3	-1,2	-0,3
12	-2,1	-0,8	-0,7	-0,8	-0,8	0,5	0,5	-0,9	-0,5
MÉDIA	-2,1	-0,4	-0,4	-0,4	-1,0	-0,5	-0,5	-0,8	-0,3
DESVIO PADRÃO	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5	0,1
ERRO PADRÃO	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,0

MDM – Múltipla Distância Máxima; MCO – Múltipla Circunferência Ótima; MAL – Múltipla Área *Laser*; MALM – Múltipla Área *Laser* Modificado; SDM – Simples Distância Máxima; SCO – Simples Circunferência Ótima; SALM – Simples Área *Laser* Modificado.

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

Por fim, a TABELA 13 apresenta os erros para a fatia 1,3 m em valores relativos de erro em relação ao valor do diâmetro da fotografia classificada. Um fato que pode ser visualizado claramente nessas tabelas de diâmetros é que a magnitude de erro é bastante menor, praticamente a metade, quando comparadas as áreas transversais diretamente.

Os resultados de diâmetro para os métodos *laser* variaram de um erro médio de -16 a -3 % sempre superestimando os diâmetros quando comparados com o diâmetro quadrático da fotografia classificada (d_g – diâmetro derivado da área transversal). Na literatura, Thies e Spiecker (2004) relataram medidas do DAP com erro médio (desvio) de 1,3% em relação aos dados tradicionais (suta) quando aplicaram a metodologia proposta por Simonse *et al.* (2003). Para comparar os dois trabalhos, considerando-se a melhor medida *laser* que teve um erro médio de -3% e confrontando-se com a medida da sutu (-6%) tem-se um erro médio em relação à sutu de 3%. Assim, tem-se um resultado mais acurado que os apresentados por Thies e Spiecker (2004), pois o valor utilizado como verdade (fotografia classificada) é mais realista que a comparação com a medida da sutu a qual possui inúmeros inconvenientes e erros de medição. Portanto, considerando-se que a sutu tem uma

medida que difere em média -6% em relação ao valor referência e aplicando-se a diferença obtida por Thies e Spiecker (2004) ter-se-ia que o erro do melhor método *laser* seria 4,7 % o que é um resultado aparentemente pior ao 3% obtido nos melhores métodos deste trabalho.

TABELA 13: ERROS EM PERCENTAGEM EM RELAÇÃO AO VALOR PARAMÉTRICO DO DIÂMETRO OBTIDO PELA FOTOGRAFIA CLASSIFICADA PARA FATIA A 1,3 M

Árvore	Erro % para diâmetros								
	MDM	MCO	MAL	MALM	SDM	SCO	SALM	Suta	Fita
1	-16,0	-4,4	-4,3	-4,3	-11,5	-6,4	-6,5	-10,2	-3,1
2	-19,0	-4,2	-3,8	-4,2	-11,9	-5,9	-5,8	-5,3	-3,1
3	-14,0	5,8	4,9	5,6	-10,4	-1,6	-1,5	-0,9	-1,3
4	-20,3	-0,2	-0,7	-0,6	-9,3	-9,5	-9,5	-5,5	-2,8
5	-27,8	-10,9	-7,5	-10,0	-8,4	-0,1	-0,3	-2,5	-3,5
6	-14,7	-3,6	-3,1	-3,3	-2,8	-1,7	-1,7	-4,6	-1,6
7	-13,8	-0,2	-0,1	0,0	-2,4	1,1	0,9	-9,2	-2,2
8	-12,8	-1,9	-3,0	-2,5	-6,8	-6,5	-6,7	-3,0	-1,5
9	-14,5	-3,4	-3,8	-3,7	-6,8	-0,3	0,0	-11,0	-1,0
10	-12,1	-2,8	-2,8	-2,9	-8,0	-6,0	-5,9	-4,9	-2,0
11	-13,5	-2,8	-3,0	-3,0	-9,6	-8,7	-8,6	-8,2	-2,3
12	-12,3	-4,7	-3,9	-4,8	-4,7	3,0	2,9	-5,2	-2,7
Média	-15,9	-2,8	-2,6	-2,8	-7,7	-3,6	-3,6	-5,9	-2,3
Desvio Padrão	4,5	3,9	3,0	3,6	3,1	4,1	4,1	3,2	0,8
Erro Padrão	1,3	1,1	0,9	1,0	0,9	1,2	1,2	0,9	0,2

MDM – Múltipla Distância Máxima; MCO – Múltipla Circunferência Ótima; MAL – Múltipla Área *Laser*; MALM – Múltipla Área *Laser* Modificado; SDM – Simples Distância Máxima; SCO – Simples Circunferência Ótima; SALM – Simples Área *Laser* Modificado.

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

Outros resultados foram apresentados por Bienert, Maas e Scheller (2006) onde os diâmetros tiveram uma média de erro de 1,5 cm em relação às medições tradicionais. Já em Bienert *et al* (2006) os erros médios em relação a suta variaram entre + 0,93 e -0,96 cm. Em Simonse *et al.* (2003) um erro médio quando comparado com medidas de suta de 1,7 cm com um desvio padrão de 2,8 cm. Se utilizarmos os valores da TABELA 12 para comparar com os resultados acima citados tem-se para o melhor método *laser* (MAL) um erro médio de -0,4 cm, sendo que os valores variam entre - 0,8 cm e 0,5 cm. Desta forma, podemos afirmar que os resultados obtidos, para o conjunto de árvores de *Pinus* spp analisado, são de elevada qualidade. No entanto, dadas as condições florestais diferenciadas não é possível inferir qual das metodologias é mais adequada para o processamento de dados laser para obtenção de variáveis dendrométricas.

4.4.2 Análise comparativa - métodos tradicionais

A análise dos dados comparando com os métodos tradicionais foi realizada para as fatias a cada 10% da altura total de cada árvore iniciando aos 5%. Nesta análise não se utilizou nenhum valor paramétrico para a comparação. Sabe-se que embora existam alguns erros de medição da suta e da fita métrica esses valores são coerentes, ou seja, não apresentam valores absurdos e se conhece a magnitude desses erros, conforme abordado no tópico anterior.

O principal intuito desta análise foi verificar se existe coerência nos dados *laser* ao longo do tronco das árvores. O principal problema que pode ocasionar erros nas medições *laser* diz respeito à densidade da copa. Portanto, esta análise das fatias a várias alturas busca a compreensão do comportamento dos métodos *laser* propostos à medida que a altura de medição aumenta. Um dos fatores determinantes é compreender se existem diferenças entre as medidas de varredura simples e de varredura múltipla e se existem métodos que são mais coerentes.

As principais análises foram estatísticas e aplicadas, na maioria das situações, em blocos ao acaso e ocasionalmente, dependendo o número de tratamentos (métodos) e repetições (árvores), como um experimento inteiramente ao acaso. A análise para algumas fatias foi realizada mais de uma vez conforme descrito na metodologia.

As TABELA 14 e TABELA 15 apresentam os resultados obtidos pelo teste de *Tukey* com 95% de probabilidade. A fatia 15% (1) foi analisada eliminando uma árvore (árvore 5), pois esta possuía um valor de diâmetro e área transversal, para o método MDM, muito discrepante com erro em relação ao valor referência superior aos 50%. Desta forma, a análise foi feita com 11 árvores e indicou que existem diferenças estatísticas entre o método MDM e os demais para o Bloco 1 (QUADRO 5, pag. 71). Já na fatia 15% (2), ao invés de eliminar a árvore 5, o método MDM foi excluído, pois este obteve um erro maior que 50% em relação ao valor referência. Eliminando o método MDM tornou-se possível analisar todas as árvores sem a necessidade de exclusão da árvore 5. Desta forma, analisaram-se todos demais métodos para as 12 árvores. Esta análise indicou que os métodos são iguais entre si para ambos os blocos. Fato semelhante ocorre com a análise da fatia 25%(1) e

25%(2). Para analisar todos os métodos conjuntamente, para a fatia 25% (1), foi necessário eliminar as árvores 1, 3 e 5 que possuíam valores para o método MDM fora dos limites de erro estabelecidos. Já eliminando o método MDM foi possível analisar conjuntamente as 12 árvores e verificar que não existem diferenças estatísticas entre os métodos analisados. Esta tendência verificada já nessas primeiras fatias indica que o método MDM não é indicado para medições ao longo do fuste, pois não apresenta coerência de resultados, ou seja, a amplitude de variação dos resultados é muito grande o que não é desejável. Desta forma, não se recomenda o uso do método MDM para medição de diâmetros ou áreas transversais com o *laser* ao longo do tronco das árvores.

Seguindo com a fatia 35%(1) foram analisados somente os métodos MAL, MCO e MALM para 11 árvores. A árvore 3, em função de problemas com ventos relatado nos resultados da filtragem, necessitou ser eliminada, pois a qualidade inicial dos dados dessa árvore já estavam comprometidos, ou seja, neste caso não poder-se-ia atribuir os erros aos métodos, mas sim a baixa qualidade dos dados em função de intempéries no momento da aquisição. Para os três métodos comparados não houve diferenças estatísticas pelo teste de *Tukey* a 95% de probabilidade. Buscando compreender os motivos pelos quais os demais métodos não apresentaram bons resultados foi elaborada a TABELA 16 que mostra a altura em que se iniciam os primeiros galhos de cada uma das árvores em valores absolutos e em valores relativos para que se possa ter uma idéia em valor percentual da altura do início das copas. Em média aos 34% da altura total das árvores ocorreu o início da copa, cabe destacar que o povoamento é de regeneração natural e sem nenhum tipo de manejo como poda, fato que contribui para ocorrência de galhos já nessas alturas. Desta forma, pode-se atribuir que os métodos que não puderam ser analisados para as 11 árvores tiveram problemas relativos à influência da copa no processamento dos dados. Assim, pode-se assumir que para alturas acima do ponto de início das copas os métodos de varredura múltipla podem gerar resultados superiores aos de varredura simples e que esses métodos de varredura múltipla possuem uma maior coerência mantendo a qualidade dos resultados até as partes iniciais das copas.

Para a fatia 35% (2) a análise foi realizada retirando o método Múltipla Distância Máxima (MDM) e as árvores 3, 4, 7, 11 e 12. Todas as árvores retiradas já

possuíam copa a 35% de suas alturas totais, o que provavelmente contribuiu para que os resultados dessas árvores fossem ruins e que seus valores necessitassem ser eliminados da análise estatística. Esta afirmação fica mais bem sustentada quando observa-se as árvores 5, 8 e 9, (árvores que participaram da análise) onde a copa começou acima dos 35%. Para esta altura, conforme a análise da fatia 35% (2), ainda existe uma boa qualidade de resultados e quando comparados estatisticamente com os demais métodos, retirando o MDM, são semelhantes.

TABELA 14: TESTE DE *TUKEY* PARA O BLOCO 1.

FATIAS (% DA ALTURA TOTAL)										
	5%	15% (1)	15% (2)	25% (1)	25% (2)	35% (1)	35% 2	45%	55%	65%
SUTA	A1	A1 A2	A1	A1	A1	-	A1	A1	-	-
FITA	A1	A1 A2	A1	A1	A1	-	A1	A1	-	-
MAL	A1	A1 A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	-	-
MCO	A1	A1 A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	-	-
MALM	A1	A1 A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	-	-
SCO	A1	A1	A1	A1	A1	-	A1	A1	-	-
SALM	A1	A1	A1	A1	A1	-	A1	A1	-	-
SDM	A1	A1 A2	A1	A1	A1	-	A1	A1	-	-
MDM	A1	A2	-	A1	-	-	-	-	-	-

Teste de Tukey para 95% de probabilidade

MDM – Múltipla Distância Máxima; MCO – Múltipla Circunferência Ótima; MAL – Múltipla Área Laser; MALM – Múltipla Área Laser Modificado; SDM – Simples Distância Máxima; SCO – Simples Circunferência Ótima; SALM – Simples Área Laser Modificado.

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

Para 45% da altura total das árvores a análise realizada em blocos ao acaso necessitou eliminar 5 árvores (Árvore 1, 3, 5, 10 e 12) e o método MDM para que fosse factível aplicar o teste de *Tukey*. Cabe destacar, que para esta percentagem da altura total das árvores todos os indivíduos analisados já apresentavam o início da copa conforme apresentado na TABELA 16. A partir deste momento os resultados tendem a piorar conforme se aumenta a altura das fatias, pois existe um adensamento crescente das copas. Com a eliminação das árvores com piores resultados e o método MDM o teste de *Tukey* apontou não existirem diferenças estatísticas entre os métodos tanto para o Bloco 1 quanto para o Bloco 2. Esta análise permite afirmar que embora existam influências da copa algumas árvores podem gerar bons resultados. Isto pode ser um indício de que algumas fatias,

cortadas a exatamente 45% da altura total das árvores com uma espessura de 2 cm, são compostas majoritariamente por pontos de galhos e folhas próximas da fatia e por poucos pontos do tronco propriamente dito. Ou seja, o efeito sombra⁵ pode ter ocorrido de forma mais drástica em algumas árvores que em outras.

TABELA 15: TESTE DE *TUKEY* PARA O BLOCO 2.

FATIAS (% DA ALTURA TOTAL)										
	5%	15% (1)	15% (2)	25% (1)	25% (2)	35% (1)	35% 2	45%	55%	65%
SUTA	A1	A1	A1	A1	A1	-	A1	A1	-	-
FITA	A1	A1	A1	A1	A1	-	A1	A1	-	-
MAL	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	-	-
MCO	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	-	-
MALM	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	-	-
SCO	A1	A1	A1	A1	A1	-	A1	A1	-	-
SALM	A1	A1	A1	A1	A1	-	A1	A1	-	-
SDM	A1	A1	A1	A1	A1	-	A1	A1	-	-
MDM	A1	A1	-	A1	-	-	-	-	-	-

Teste de Tukey para 95% de probabilidade

MDM – Múltipla Distância Máxima; MCO – Múltipla Circunferência Ótima; MAL – Múltipla Área Laser; MALM – Múltipla Área Laser Modificado; SDM – Simples Distância Máxima; SCO – Simples Circunferência Ótima; SALM – Simples Área Laser Modificado.

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

TABELA 16: ALTURAS ABSOLUTAS E RELATIVAS DO INÍCIO DAS COPAS DAS ÁRVORES

Árvore	Altura do Início da copa (m)	Altura total (m)	Altura copa (%)
1	3,8	15,5	25
2	morta	14,7	morta
3	3,8	12,8	30
4	5	14,4	35
5	5,2	13,8	38
6	4,7	14,1	33
7	5,4	17,14	32
8	5,2	12,6	41
9	6,2	14,2	44
10	5,2	16	33
11	4,8	13,9	35
12	4,9	15,3	32
Média	4,9		34

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

⁵ Efeito sombra é causado quando objetos como galhos e folhas acabam impedindo que os raios laser atinjam o objeto de interesse, neste caso o tronco.

Para as fatias 55% e 65% a maioria das árvores e dos métodos perderam coerência e não funcionaram adequadamente. Neste caso, aplicou-se nas árvores e tratamentos restantes o delineamento inteiramente ao acaso, conforme foi apresentado no tópico 3 de procedimentos metodológicos. Os resultados para o teste de *Tukey* para a fatia 55% e 65% são apresentados na TABELA 17.

TABELA 17: RESULTADOS DO TESTE DE *TUKEY* ($\alpha = 0,05$) PARA AS FATIAS 55% E 65%

	Delineamento inteiramente ao acaso	
	Fatias (% da Altura Total)	
	55%	65%
SUTA	A1	A1
FITA	A1	A1
MAL	A1	A1
MCO	A1	A1
MALM	A1	A1
SCO	A1	A1
SALM	A1	A1
SDM	A1	A1
MDM	-	A1

MDM – Múltipla Distância Máxima; MCO – Múltipla Circunferência Ótima; MAL – Múltipla Área *Laser*; MALM – Múltipla Área *Laser* Modificado; SDM – Simples Distância Máxima; SCO – Simples Circunferência Ótima; SALM – Simples Área *Laser* Modificado.

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

Para a fatia a 55% da altura total nenhuma árvore apresentou coerência na medida do método MDM, portanto, este foi eliminado da análise estatística. Os demais métodos analisados são estatisticamente iguais ao nível de 5% de significância. Já na fatia 65% o método MDM voltou a ser coerente para algumas árvores e a estatística demonstrou que não existem diferenças significativas para os 9 métodos comparados. Cabe destacar que praticamente 50% das árvores tiveram que ser eliminadas para as fatias a 55 e 65% e nem todos os métodos que funcionaram para uma determinada árvore eram adequados para as demais, indicando uma baixa qualidade de dados a partir destas alturas. Isto reflete ao que foi anteriormente descrito. Todas as árvores nessas alturas já possuem uma copa bastante densa. Portanto, a influência dos galhos e acículas ocorre de forma diferenciada para cada uma das árvores o que ocasiona resultados com baixa coerência dos métodos.

Para se compreender o comportamento dos dois melhores métodos, MAL para varredura múltipla e SALM para varredura simples, foram elaboradas as FIGURA 33, 34 e 35, as quais apresentam os perfis das árvores obtidos pela suta, fita, MAL e SALM. Os valores de áreas transversais foram convertidos para diâmetros (Eixo Y) e o percentual da altura total das árvores é apresentado no eixo X. Um traço foi colocado em cada uma das árvores indicando a altura em que se iniciou a copa.

Na FIGURA 33 pode-se notar a tendência geral que ocorre também para as demais árvores. A curva do método MAL se apresenta mais aderente que o método SALM mostrando um considerável ganho ao se utilizar a nuvem de pontos de varredura múltipla, principalmente quando se deseja saber diâmetros ou áreas transversais em alturas mais elevadas dos troncos. Fica bastante claro ao observar-se a árvore 2 que o grande problema de processamento dos dados *laser* está quando se atinge as copas das árvores. A árvore 2 (morta, sem acículas e poucos galhos secos) viabilizou a aquisição de pontos do fuste ao longo de toda a árvore. Neste indivíduo a modelagem de diâmetros e áreas transversais é coerente, estando mais próxima das medidas da suta e da fita, ao contrário das demais árvores em que os valores a partir dos 60% da altura total das árvores perdem a confiabilidade.

Observando também nas FIGURA 34 e FIGURA 35 pode-se perceber que a partir dos 30% da altura total das árvores, principalmente para varredura simples (SALM) as estimativas com o *laser* começam a perder qualidade rapidamente. Conforme abordado anteriormente, a partir dos 30-35% da altura total começa a haver grande influência da copa o que faz com que a qualidade dos resultados diminua à medida que ocorre um adensamento da copa. Quando se chega aos 60% da altura total das árvores ambos os métodos (MAL e SALM) chegam ao seu limite. A partir deste ponto a copa causa tamanha influência que a modelagem fica comprometida. Esta afirmação pode ser feita porque a única árvore cujo resultado foi diferente foi a árvore 2 que justamente por não possuir copa pode ser modelada até o topo com aderência às curvas da suta e da fita.

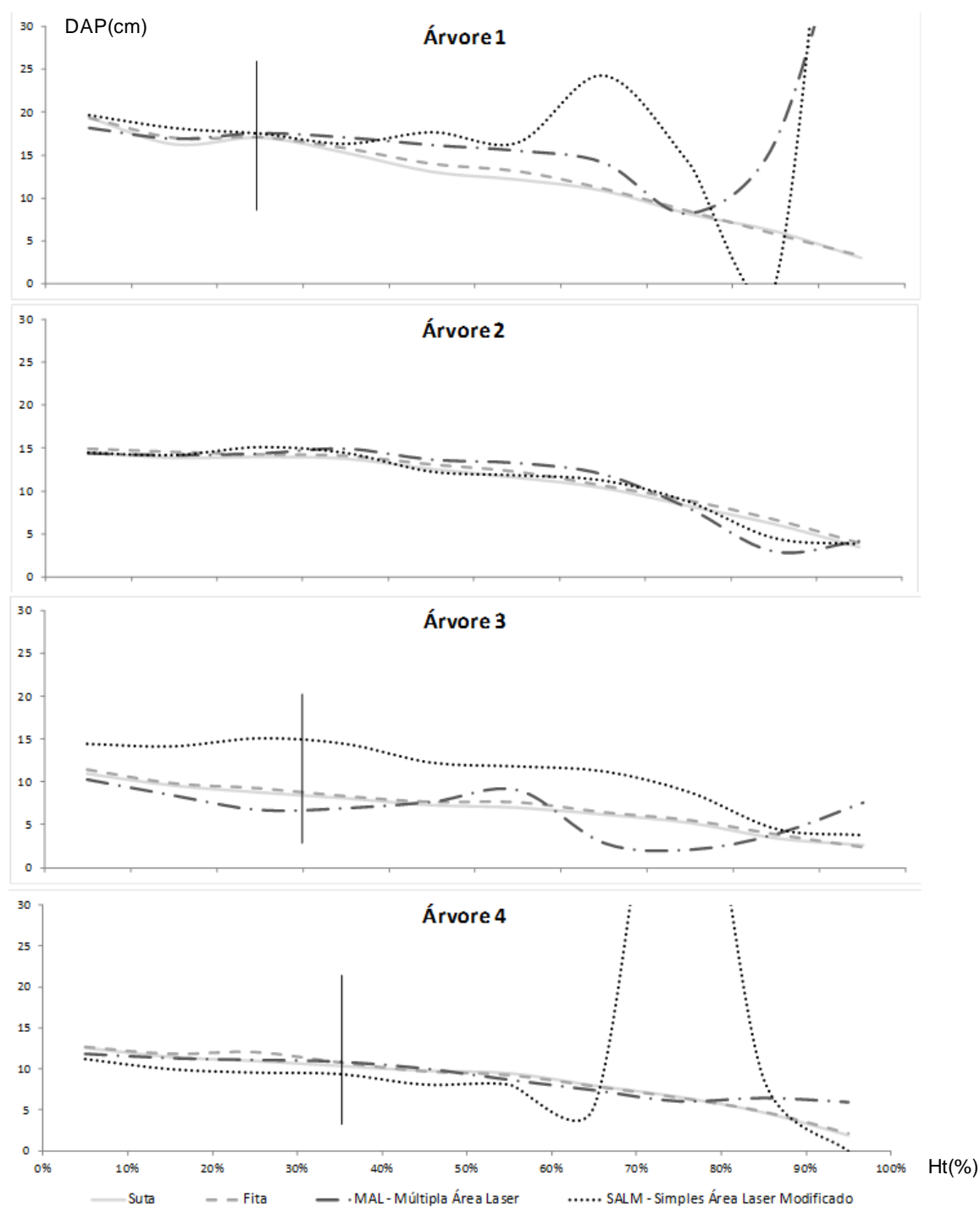


FIGURA 33 - PERFIL DE CADA ÁRVORE MEDIDO PELA SUTA, FITA E MELHORES MÉTODOS LASER. AS LINHAS PARALELAS AO EIXO Y INDICAM O INÍCIO DAS COPAS DAS ÁRVORES
 FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

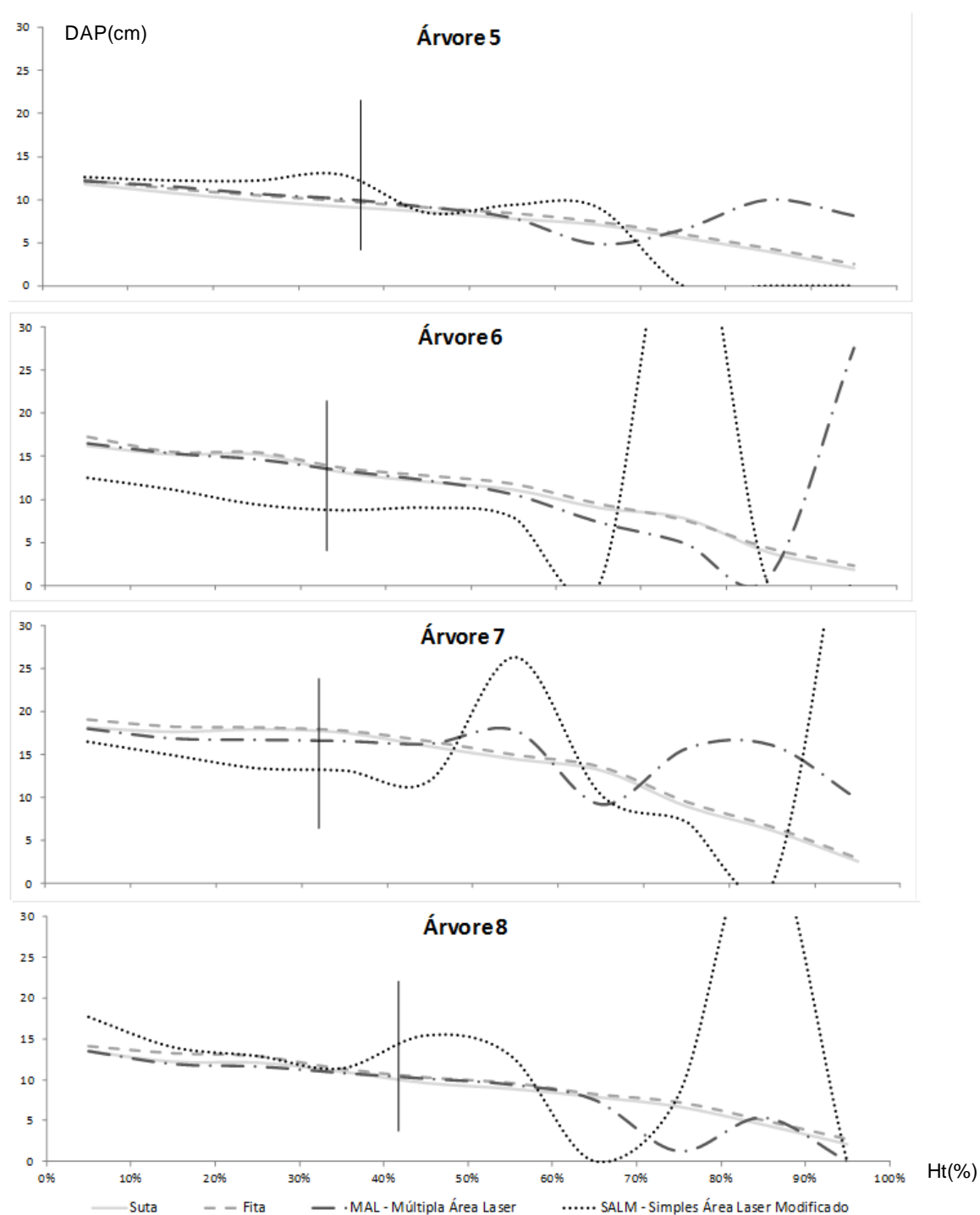


FIGURA 34 - PERFIL DE CADA ÁRVORE MEDIDO PELA SUTA, FITA E MELHORES MÉTODOS LASER. AS LINHAS PARALELAS AO EIXO Y INDICAM O INÍCIO DAS COPAS DAS ÁRVORES
 FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

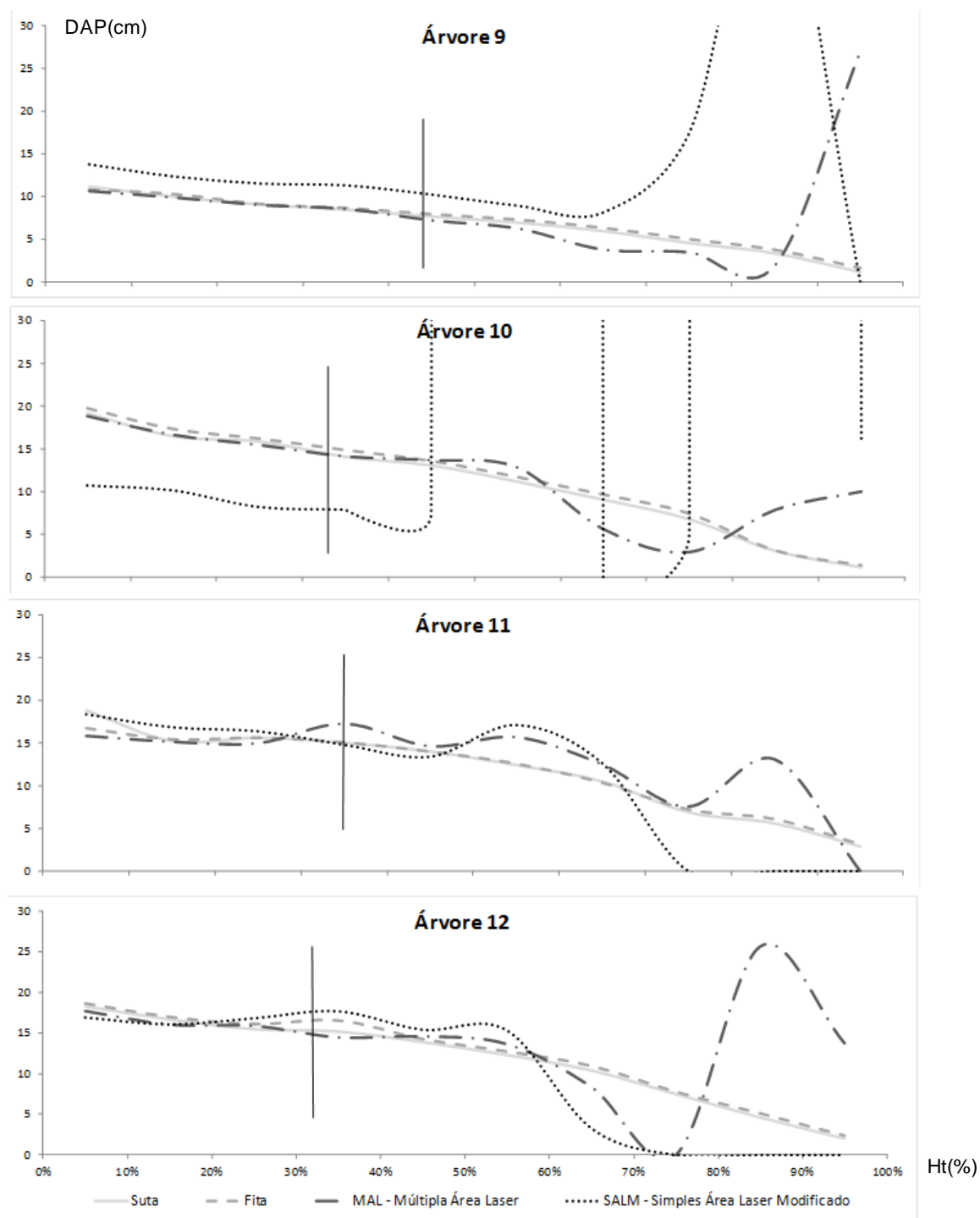


FIGURA 35 - PERFIL DE CADA ÁRVORE MEDIDO PELA SUTA, FITA E MELHORES MÉTODOS LASER. AS LINHAS PARALELAS AO EIXO Y INDICAM O INÍCIO DAS COPAS DAS ÁRVORES
 FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

Essas problemáticas nas partes superiores das árvores têm sido relatadas na literatura. Conforme Gatziolis *et al.* (2010) dificuldades podem ser encontradas para determinar as medidas de diâmetros na parte superior das árvores em função de suas copas.

Problemas semelhantes aos encontrados neste trabalho são relatados por Côté; Fournier e Egli (2011). Nas aplicações florestais a oclusão dos objetos (efeito sombra) e os ventos no momento da coleta de dados têm se tornado um problema.

4.5 ESTIMATIVAS DE VOLUMES

Os volumes foram calculados para as três primeiras toras com 1 metro de comprimento cada uma delas pelos métodos de *Smalian*, *Huber* e *Newton*. A primeira tora foi de 0,1 m a 1,1 m, a segunda tora de 1,1 m a 2,1 e a terceira e última tora de 2,1 a 3,1 m.

As medidas de área transversal obtidas pelos dois melhores métodos *laser* (MAL e SALM) foram aplicadas nas fórmulas de cubagem dos métodos de cubagem utilizados. Nas mesmas alturas, para fins de comparação, os volumes foram calculados da mesma forma utilizando as medições de diâmetro com a suta e a fita métrica. Os métodos foram confrontados com o parâmetro xilômetro buscando verificar se as medidas do *laser* são mais acuradas que as medidas tradicionais e se existem diferenças estatísticas entre as médias dos volumes das 12 árvores obtidos pelos diferentes métodos.

Huber foi o melhor método de cubagem para a primeira tora. Os volumes que mais se aproximaram do valor verdade (xilômetro) foram gerados pelo método MAL (-1% na média) e pela suta (-5% na média), conforme é apresentado na TABELA 18.

TABELA 18: ERROS DE VOLUME POR MÉTODOS QUANDO COMPARADO COM O XILÔMETRO PARA A PRIMEIRA TORÁ.

Erros de volume (%)												
Árvore	Smalian				Huber				Newton			
	MAL	SALM	SUTA	FITA	MAL	SALM	SUTA	FITA	MAL	SALM	SUTA	FITA
3	-31	-62	-37	-45	-20	-42	-26	-44	-24	-48	-30	-44
2	-39	-486	-16	-24	-10	-3	-17	-26	-20	-164	-17	-26
8	-30	-43	-24	-35	-9	-15	-12	-20	-16	-24	-16	-25
5	-30	-21	-24	-27	-9	-19	-1	-10	-16	-19	-9	-16
7	-19	-10	-26	-25	-7	0	-10	-26	-11	-3	-15	-25
12	-24	-20	-18	-27	-4	-9	-5	-13	-11	-13	-9	-18
10	-21	-16	-23	-21	-3	-14	-21	-20	-9	-15	-21	-20
4	-5	-13	-17	-19	2	-4	-8	-27	0	-7	-11	-25
1	-21	-175	-4	-19	3	-21	7	-9	-5	-72	3	-13
9	-28	-22	13	3	8	0	7	3	-4	-8	9	3
6	-1	-1	11	3	15	17	16	13	10	11	14	10
11	12	0	17	12	28	10	15	23	23	7	16	19
Média	-20	-72	-12	-19	-1	-8	-5	-13	-7	-30	-7	-15

MAL – Múltipla Área Laser; SALM – Simples Área Laser Modificado.

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

Os métodos de *Smalian* e de *Newton* para a tora 1 não foram adequados. Conforme abordado nos resultados de filtragem um problema global que ocorreu praticamente em todas as árvores foi a má filtragem de pontos *laser* na base. Como os métodos de *Smalian* e *Newton* utilizam o valor da seção transversal da base nas suas fórmulas de cubagem, e os valores na base das toras acabam sendo superestimados por problemas de filtragem, ocorre que esses dois métodos de cubagem, devido à contaminação da área transversal da base, superestimam os valores de volume. O método de *Huber* teve uma maior aproximação dos volumes reais. Na fórmula de *Huber* apenas o valor da seção transversal do ponto médio da tora é utilizado e, desta forma, o método consegue eliminar os problemas decorrentes das superestimativas da base da primeira tora.

A classificação dos erros foi realizada de forma ascendente com base no método Múltipla Área Laser. Desta forma, as árvores onde os erros foram maiores encontram-se nos limites da TABELA 18. Analisando as árvores de maior erro para o método de *Huber* percebe-se que, embora sejam grandes para os métodos *laser*, em geral, são ainda maiores para as medidas tradicionais obtidas pela suta e fita métrica.

Já para a segunda tora (TABELA 19) o método de *Huber* continuou sendo bom, mas foi inferior, na média, aos valores da cubagem de *Smalian* e de *Newton*. Isto ajuda a esclarecer que o principal problema dos métodos de *Smalian* e de

Newton, quando aplicados à primeira tora da árvore, é a contaminação pela superestimativa da área transversal da base das árvores.

TABELA 19: ERROS DE VOLUMES POR MÉTODOS QUANDO COMPARADO COM O XILÔMETRO PARA A SEGUNDA TORAS.

Erros de volume (%)												
Árvore	Smalian				Huber				Newton			
	MAL	SALM	SUTA	FITA	MAL	SALM	SUTA	FITA	MAL	SALM	SUTA	FITA
5	-24	-20	-16	-22	-30	-25	-16	-21	-28	-24	-16	-22
2	-23	-14	-17	-23	-22	-22	-20	-25	-22	-19	-19	-25
12	-5	5	-6	-10	-18	8	-13	-21	-14	7	-11	-17
3	-2	-35	-27	-32	-15	-45	-28	-28	-11	-42	-28	-29
6	-17	-10	-7	-14	-13	-10	-7	-17	-15	-10	-7	-16
4	0	-30	-12	-11	-9	-29	-21	-17	-6	-29	-18	-15
1	-8	-24	-8	-11	-9	-24	-16	-16	-9	-24	-13	-14
8	-5	-15	-2	-8	-6	-21	-15	-16	-6	-19	-11	-13
10	-5	-14	-12	-9	-1	-2	-7	-11	-3	-6	-9	-10
7	-7	3	-18	-18	0	1	-19	-15	-2	1	-19	-16
9	-1	-4	9	-3	5	12	10	2	3	6	9	0
11	13	1	18	10	15	11	22	11	14	8	21	11
Média	-7	-13	-8	-13	-9	-12	-11	-14	-8	-12	-10	-14

MAL – Múltipla Área Laser; SALM – Simples Área Laser Modificado.

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

Para a terceira tora (TABELA 20) a tendência apresentada para a segunda tora se manteve. O melhor método foi o *Smalian*, porém houve poucas diferenças em relação ao *Newton* e *Huber*. Cabe um destaque ao método MAL na árvore 3. Enquanto os erros no método de *Huber* para as medidas tradicionais e de varredura simples estão abaixo de -5% na varredura múltipla (MAL) o erro passou dos 32%. Um valor bastante alto quando comparado aos demais. Porém, pode ser explicado, pois para esta última tora já se havia constatado problemas de vento que por consequência deslocaram as nuvens de pontos *laser* gerando resultados ruins tanto para diâmetros e áreas transversais quanto para volumes. As demais árvores que possuem erro alto (árvores 6, 2, 5 e 1) para o MAL não apresentaram resultados muito superiores para as medidas tradicionais, mostrando que tanto as medidas tradicionais quanto as medidas *laser* não foram adequadas para descrever a tora. Este fato poderia ser melhorado para as medições *laser* por meio da aplicação de técnicas de triangulação de pontos buscando gerar superfícies mais fiéis dos troncos deixando de lado os métodos de cubagem rigorosa utilizados.

TABELA 20: ERROS DE VOLUMES POR MÉTODOS QUANDO COMPARADO COM O XILÔMETRO PARA A TERCEIRA TORÁ.

Árvore	Erros de volume (%)											
	Smalian				Huber				Newton			
	MAL	SALM	SUTA	FITA	MAL	SALM	SUTA	FITA	MAL	SALM	SUTA	FITA
6	-20	-11	-3	-14	-34	-31	-9	-17	-29	-24	-7	-16
2	-35	-25	-27	-33	-32	-42	-25	-35	-33	-36	-26	-35
5	-27	-16	-12	-20	-24	-17	-12	-20	-25	-17	-12	-20
1	-5	-15	1	-2	-11	-41	-12	-15	-9	-32	-8	-11
9	-10	-17	-8	-12	-10	-26	-2	-14	-10	-23	-4	-13
8	-18	-26	-9	-18	-6	-1	-2	-15	-10	-9	-5	-16
10	-5	-15	-4	-8	-5	-11	-11	-15	-5	-12	-9	-12
7	1	23	-12	-11	1	32	-11	-14	1	29	-11	-13
12	1	12	0	1	3	17	5	-4	2	16	3	-2
4	8	-26	7	-1	6	-47	3	-1	7	-40	4	-1
11	13	-3	21	12	7	-17	14	9	9	-12	16	10
3	31	-19	-11	-9	32	-2	2	-5	32	-8	-2	-6
Média	-6	-11	-5	-10	-6	-15	-5	-12	-6	-14	-5	-11

MAL – Múltipla Área Laser; SALM – Simples Área Laser Modificado.

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

As FIGURA 36, 37 e 38 apresentam os erros dos métodos *laser* testados e dos métodos tradicionais em relação ao xilômetro quando usadas as fórmulas de cubagem de *Smalian*, *Huber* e *Newton*. Na FIGURA 36 é clara a visualização de que os métodos de *Smalian* e *Newton* superestimam os valores de volume. O gráfico de *Huber* apresenta uma distribuição de erros mais equilibrada o que é extremamente desejável. Nas FIGURA 37 e FIGURA 38 esta mesma tendência, embora mais sutil, pode ser notada. Desta forma, recomenda-se para o cálculo de volumes com *laser scanner* por meio da aplicação de fórmulas de cubagem utilizar o método de *Huber*.

A qualidade deste método para cubagem rigorosa no gênero *Pinus* já havia sido atestada por Machado e Nadolny (1991) e por Figueiredo Filho; Machado e Carneiro (2000). Confirma-se a qualidade deste método também para a aplicação com medições de *laser scanner* terrestre.

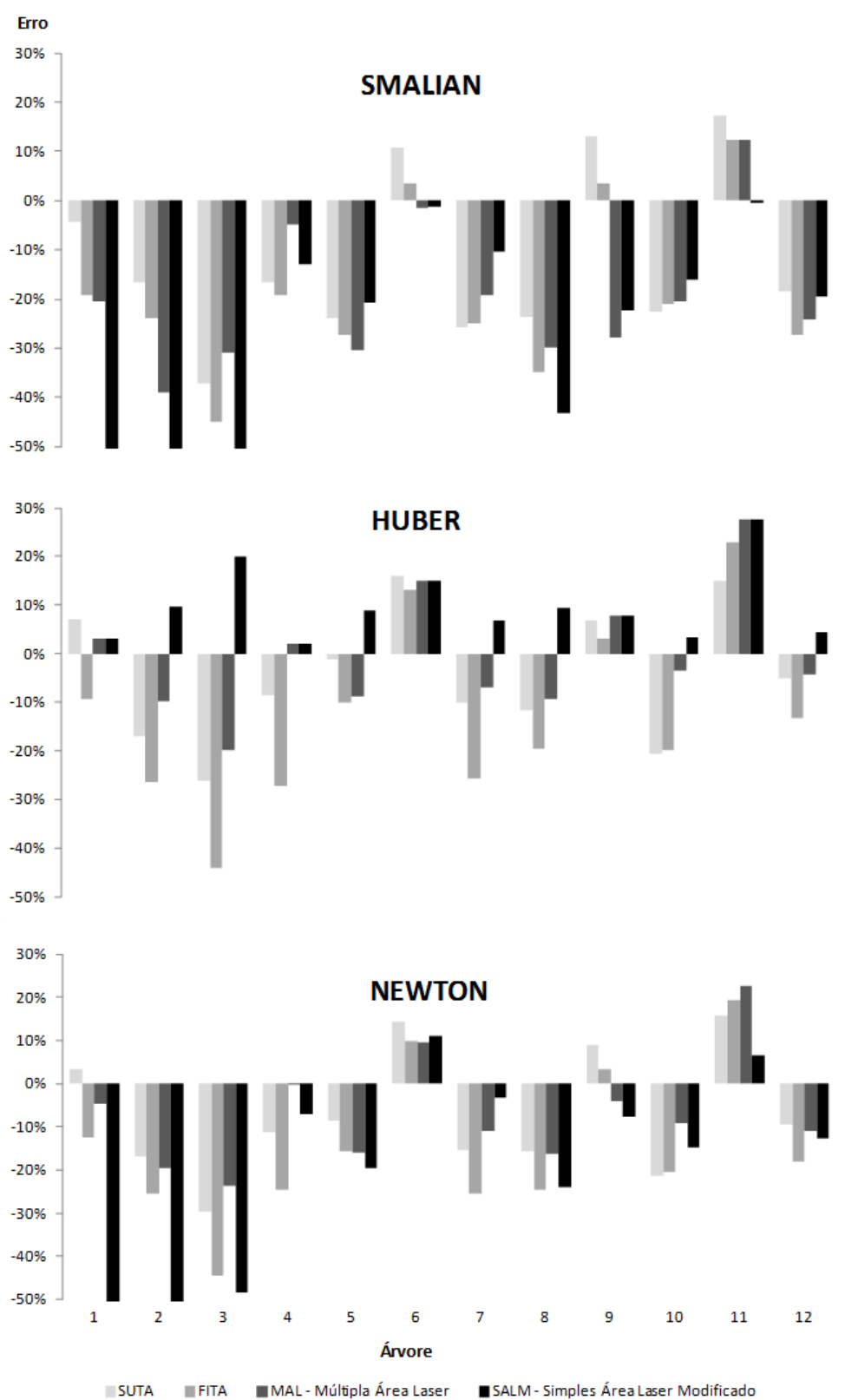


FIGURA 36 - DISTRIBUIÇÃO DOS ERROS DE VOLUME PARA A TOR 1
 FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

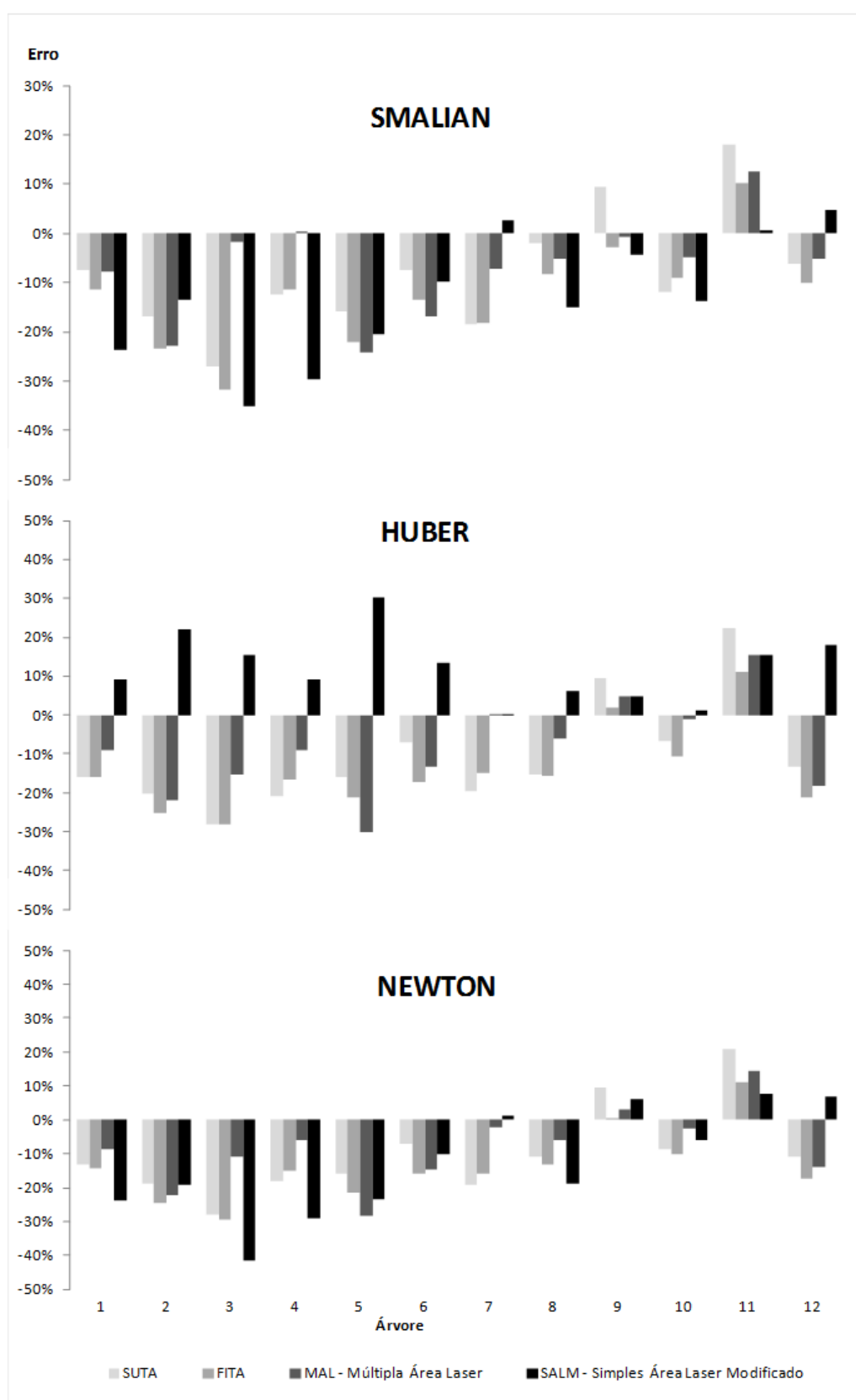


FIGURA 37 - DISTRIBUIÇÃO DOS ERROS DE VOLUME PARA A TOR 2
 FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

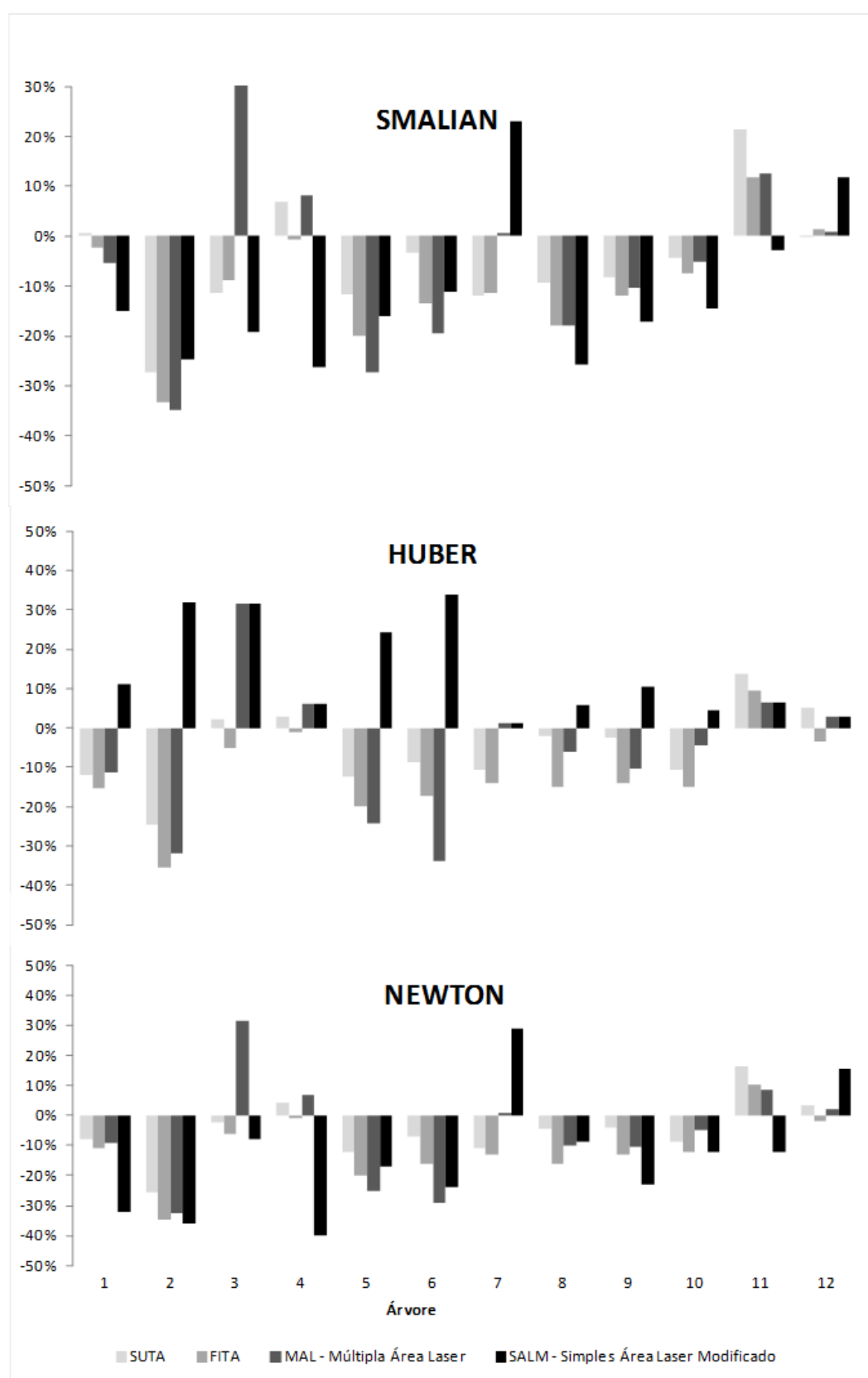


FIGURA 38 - DISTRIBUIÇÃO DOS ERROS DE VOLUME PARA A TOR 3
 FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

A fim de verificar a qualidade dos resultados para a soma das três toras elaborou-se a FIGURA 39. Percebe-se que o método de *Huber* se mantém como o mais adequado para determinação de volumes. As medidas de varredura múltipla se aproximam muito das medidas tradicionais e, em alguns casos, com resultados de maior acurácia. O melhor método de varredura simples (SALM) apresenta resultados inferiores aos de varredura múltipla e em muitos casos erros maiores que as medidas tradicionais.

Sendo um dos objetivos deste trabalho determinar para cada uma das variáveis dendrométricas a existência, ou não, de diferenças estatísticas entre métodos *laser*, medidas tradicionais e valores paramétricos, realizou-se o teste de *Tukey* em blocos ao acaso utilizando a mesma divisão de blocos dos diâmetros e áreas transversais.

As TABELA 21 e 20 apresentam os resultados do teste de *Tukey* respectivamente para o bloco 1 e 2 (QUADRO 5, pag. 71). Os valores do método *Newton* (SALM) e *Smalian* (SALM) para a primeira tora precisaram ser eliminados da análise estatística, pois possuíam valores muito discrepantes que tornavam as variâncias heterogêneas. Desta forma, não recomenda-se o uso dos métodos de *Smalian* nem de *Newton* para cubagem da primeira tora, principalmente quando se utilizam dados de varredura simples. Utilizando o método de *Huber*, para qualquer umas das 3 toras analisadas, tem-se os melhores resultados.

Estatisticamente não existem diferenças entre os métodos testados, porém dado que os erros de varreduras múltiplas são menores recomenda-se seu uso para determinação de volumes quando se deseja atingir uma maior precisão.

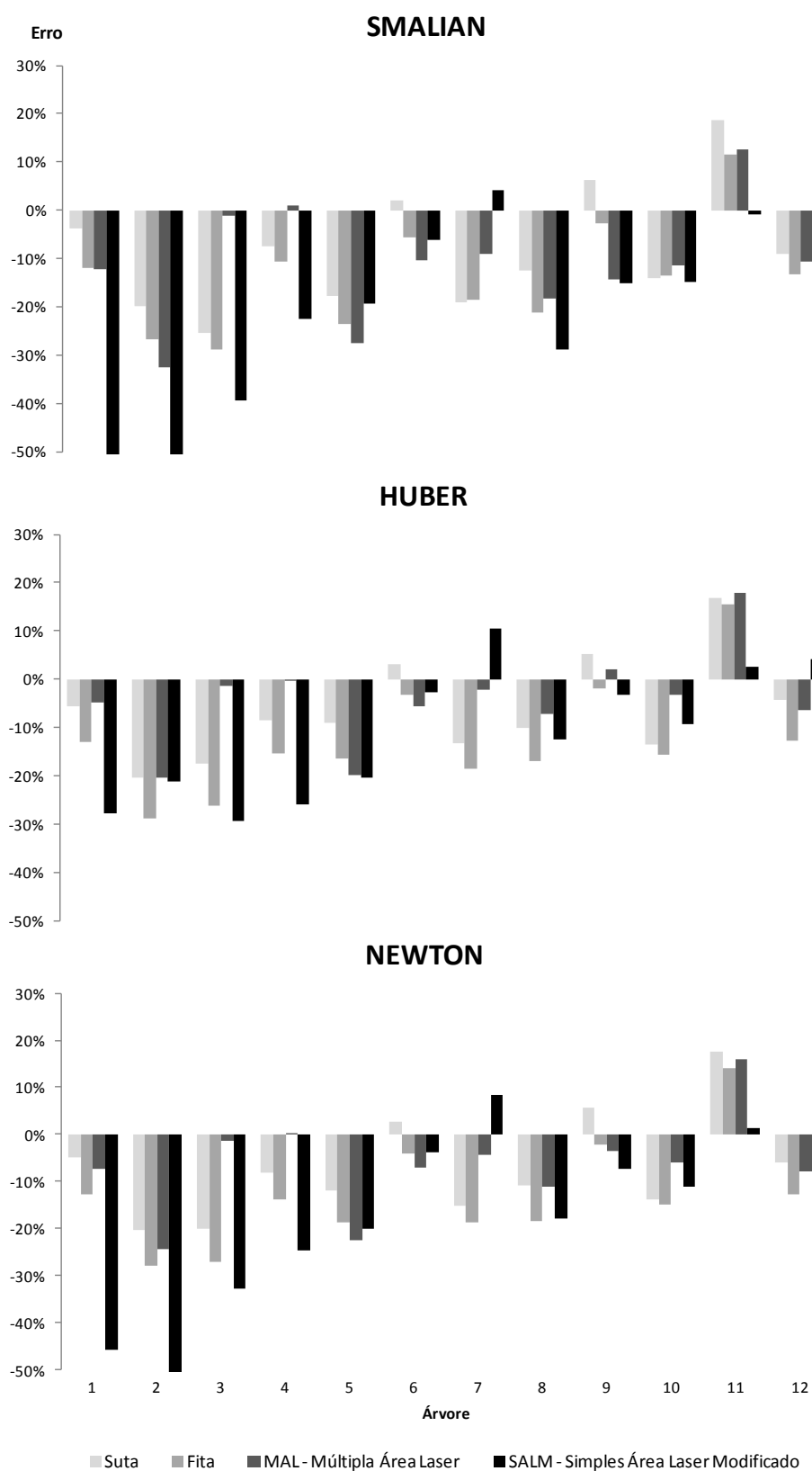


FIGURA 39 - DISTRIBUIÇÃO DE ERROS DE VOLUME POR ÁRVORE PARA O SOMATÓRIO DAS 3 PRIMEIRAS TORAS.

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

TABELA 21 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO BLOCO 1 PARA OS VOLUMES DAS TRÊS PRIMEIRAS TORAS.

ANÁLISE BLOCO 1			
	Tora 1	Tora 2	Tora 3
Huber MAL	A1	A1	A1
Huber Suta	A1	A1	A1
Xilometro	A1	A1	A1
Newton MAL	A1	A1	A1
Newton Suta	A1	A1	A1
Huber SALM	A1	A1	A1
Huber Fita	A1	A1	A1
Smalian Suta	A1	A1	A1
Newton Fita	A1	A1	A1
Smalian MAL	A1	A1	A1
Smalian Fita	A1	A1	A1
Newton SALM	-	A1	A1
Smalian SALM	-	A1	A1
DIFERENÇA ENTRE BLOCOS SIM			
Teste de Tukey para 95% de probabilidade			

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

TABELA 22 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DO BLOCO 2 PARA OS VOLUMES DAS TRÊS PRIMEIRAS TORAS.

ANÁLISE BLOCO 2			
	Tora 1	Tora 2	Tora 3
Huber MAL	A1	A1	A1
Huber Suta	A1	A1	A1
Xilometro	A1	A1	A1
Newton MAL	A1	A1	A1
Newton Suta	A1	A1	A1
Huber SALM	A1	A1	A1
Huber Fita	A1	A1	A1
Smalian Suta	A1	A1	A1
Newton Fita	A1	A1	A1
Smalian MAL	A1	A1	A1
Smalian Fita	A1	A1	A1
Newton SALM	-	A1	A1
Smalian SALM	-	A1	A1
DIFERENÇA ENTRE BLOCOS SIM			
Teste de Tukey para 95% de probabilidade			

FONTE: Elaborado pelo Autor (2011).

Até o presente estudo, não existe na literatura científica informações sobre o real resultado de volume obtido por dados *laser scanner* terrestre, pois as

comparações tem sido feitas entre os resultados do *laser* e aqueles de medidas tradicionais, conforme mostrado em Hopkinson *et al.* (2004), Király e Brolly (2010) e Gatziolis *et al.* (2010), o que não permite aferir a real qualidade de resultados.

O uso dos dados *laser* foi estudado por Gatziolis *et al.* (2010), em povoamentos de *Pinus ponderosa* e *Abies grandis*, onde encontraram erro absoluto inferior a 2% para o volume da árvore. Conforme se pode observar nesse trabalho os resultados de volume para varredura múltipla são ligeiramente melhores que para varredura simples. Desta forma, assim como citado por Gatziolis *et al.* (2010), recomenda-se a realização de visadas múltiplas com alta densidade de pontos para obtenção de volumes com maior acurácia.

5 CONCLUSÕES

As duas hipóteses levantadas neste trabalho foram comprovadas com algumas restrições. A primeira hipótese levantada afirma não existirem diferenças significativas entre os resultados do processamento *laser* e das medidas tradicionais para as variáveis analisadas. Esta foi comprovada para alguns métodos de processamento *laser*. Porém, com uma limitação, a partir do adensamento das copas (60% da altura total das árvores para este conjunto de indivíduos) as medidas tradicionais começam a diferir das medições *laser*.

A segunda hipótese em que se afirmava não existirem diferenças significativas entre varreduras simples e múltiplas foi estatisticamente comprovada para as variáveis: altura total, diâmetros, áreas transversais e volumes. No entanto, os resultados de varredura múltipla mostraram-se sempre mais coerentes e com resultados mais acurados. Assim, recomenda-se o uso de varreduras múltiplas quando se deseja uma maior precisão como, por exemplo, na cubagem de árvores para o ajuste de equações de volume. Para medição de variáveis comuns como DAP, área transversal e altura total das árvores o uso de varreduras simples é conveniente, pois a coleta e processamento de dados é mais rápida e simplificada.

O planejamento da coleta de dados *laser* ainda é pouco estudado. Inúmeros aspectos como a definição da resolução ótima de coleta, o número de posicionamentos e localização do equipamento precisam ser desenvolvidos para que se tenha uma coleta de dados otimizada. A demarcação das árvores é essencial para garantir o mesmo posicionamento das medidas tradicionais, paramétricas e *laser*. A proximidade do escritório é determinante para realização de adequações e checagens dos dados *laser* antes do corte das árvores.

A filtragem dos dados *laser* de forma interativa é uma atividade demorada e muito subjetiva. Porém, gera resultados com qualidade para determinação da altura total, diâmetros e volumes das árvores. A avaliação qualitativa dos resultados da filtragem contribuiu para identificação de problemas tais como vento, baixa amostragem de pontos e má filtragem. Estes, por sua vez, causaram efeitos conseqüentes que foram observados na qualidade dos resultados dendrométricos.

Os resultados alcançados por meio do processamento *laser* para obtenção da altura total das árvores são bastante acurados. Tanto o processamento da

varredura simples quanto da múltipla geram resultados superiores ao Vertex quando comparados com o valor de referência.

Os diâmetros e áreas transversais, quando comparados com o valor paramétrico da área da fotografia digital classificada, com exceção do método MDM (Múltipla Distância Máxima), não diferem estatisticamente entre si para as alturas de 1,3; 2,3 e 3,3 metros. Assim, não é recomendado o uso do método MDM para medição de diâmetros e áreas transversais.

Os métodos MAL (Múltipla Área Laser) e SALM (Simples Área Laser Modificado) foram os que apresentaram comportamento mais semelhante ao perfil da suta e da fita ao longo do tronco. Sendo os métodos mais indicados para varredura múltipla e simples respectivamente.

A partir do início das copas das árvores existe um decréscimo na qualidade dos resultados principalmente para varreduras simples. O limite para determinação de diâmetros com coerência por meio de dados *laser*, para o conjunto de dados desta pesquisa, é 60% da altura total das árvores. Isto se deve porque as árvores analisadas são de regeneração natural, sem poda, tendo o início das copas em média aos 34% da altura total. Assim, aos 60% da altura total já existe um grande adensamento de copas inviabilizando que os raios *laser* atinjam os fustes.

Embora não existam diferenças estatísticas entre varreduras simples e múltiplas é recomendável o uso de varreduras múltiplas quando o objetivo do levantamento exija maior acurácia.

Os volumes obtidos pelo processamento *laser*, medidas tradicionais e xilômetro são estatisticamente iguais, com exceção do método de *Newton* e *Smalian* para a primeira tora calculada pelo *laser*.

O melhor método de cubagem rigorosa aplicado as medidas *laser* foi o *Huber*.

O volume das três primeiras toras de um metro foi melhor descrito pelo método *laser* MAL, que pelas medidas tradicionais de suta e fita quando aplicada a metodologia de *Huber*.

Em âmbito geral conclui-se que as copas das árvores são o principal fator limitante para modelagem do tronco com dados *laser*. Os ventos são um fator limitante na coleta de dados *laser* refletindo na qualidade dos resultados. Árvores com formas mais irregulares, como é o caso das árvores 4 e 7, são melhor descritas

pelos processamentos *laser* que buscam aproximar a área transversal real, MAL e SALM, do que por medidas tradicionais (suta e fita).

Embora se recomende o uso de varreduras múltiplas, a comprovação de que não existem diferenças estatísticas entre os dados de varredura simples e múltipla é de extrema importância, pois podem vir a facilitar os processos de aquisição de dados *laser* em parcelas, visto que coletar dados de varreduras múltiplas significa um grande aumento de tempo (pelo menos o dobro de tempo).

As metodologias propostas proporcionam informações sobre a qualidade dos resultados *laser*, e podem contribuir para futuros trabalhos que busquem automatizar os processos de inventário florestal com o gênero pinus.

Os dados *laser scanner* terrestre tem acurácia para gerar informações dendrométricas das árvores cabendo um maior desenvolvimento de técnicas de processamento e melhorias nos equipamentos *laser* no que diz respeito a sua portabilidade (peso, tamanho, acessórios) e velocidade de coleta.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os principais desafios para futuros trabalhos são: melhorias na programação computacional implementando e melhorando as rotinas do *software* DENDROLASER; automatização da filtragem para eliminação da subjetividade na análise; desenvolvimento de metodologia para utilização das demais medidas de diâmetro e área transversal, a cada 10 cm, obtidas pelo programa DENDROLASER, buscando uma melhoria dos resultados nas alturas acima do início das copas.

Por fim, a interligação das metodologias de processamento de dados *laser scanner* terrestre deveria ser realizada em um único programa. A partir deste momento, caberiam testes práticos por meio da realização de um inventário florestal utilizando somente o *laser scanner* terrestre confrontando com os resultados de inventário florestal padrão realizado nas empresas do setor florestal. Desta maneira, poder-se-ia comprovar a aplicação real desses equipamentos restando unicamente a avaliação de viabilidade econômica para substituição de inventário florestal comum por inventário florestal com *laser scanner* terrestre.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, C.. **Levantamentos topográficos**: apontamentos de topografia.. Lisboa: Faculdade de ciências, Universidade de Lisboa, Departamento de Matemática, 1995.

ASCHOFF, T.; SPIECKER, H.. Algorithms for the automatic detection of trees in *laser scanner* data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36 – 8/w2. Freiburg, 2004.

ASCHOFF, T.; THIES, M.; SPIECKER, H.. Describing forest stands using terrestrial *laser-scanning*. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences** v. 35, comm. 5, p. 237- 241, 2004.

BAGNATO, V. S.. Os fundamentos da luz *laser*. **Física na Escola**, São Carlos, v. 2, n. 2, p. 4-9, out. 2001

BARROS, W. S.. **Implementação e validação de método comparativo de calibração de sistema por interferometria a laser para medição linear**. 2002. Dissertação (Mestrado em Metrologia para a Qualidade Industrial) – Centro Técnico Científico, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

BIENERT, A.,SCHELLER, S.; KEANE, E.; MOHAN, F.; NUGENT, C.. Tree detection and diameter estimations by analysis of Forest terrestrial *laser scanner* point clouds. **ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007**. Finland, 2007.

BIENERT, A.,SCHELLER, S.; KEANE, E.; MULLOOLY, G. MOHAN, F.. Application of terrestrial *laser scanners* for the determination of forest inventory parameters. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 36. 2006.

BIENERT, A.; MAAS, H.G.; SCHELLER, S.. Analysis of the information content of terrestrial *laserscanner* point clouds for the automatic determination of forest inventory parameters. In: **Workshop on 3D Remote Sensing in Forest**, 14-15. Vienna, 2006.

BUCKSCH, A.; FLECK, S.; RUMPF, S.; RADEMACHER, P.. Woody biovolume extraction from *laser* scanned trees. In: **SILVILASER 2010**, 10., 2010, Freiburg, **Proceedings...** Freiburg: SILVILASER 2010. 1 CD-ROM.

CÔTÉ, J. F.; FOURNIER, R. A.; EGLI, R.. An architectural model of trees to estimate forest structural attributes using terrestrial LiDAR. **Environmental Modelling & Software**, n. 26, p. 761-777, jun. 2011.

DANSON, F. M.; HETHERINGTON, D.; MORSDORF, F.; KOETZ, B.; ALLGÖWER, B. Terrestrial *laser scanners* to measure forest canopy gap fraction. In: **SILVILASER 2008**, Edinburgh UK. p. 335–341, 2008.

ELOFORTE.Suta Haglof Mantax. Disponível em: <<http://www.eloforte.com>>. Acesso em: 28 set. 2011.

FIGUEIREDO FILHO, A.; MACHADO, S do A.; CARNEIRO, M.R.A. Testing accuracy of log volume calculation procedures against water displacement techniques (xylometer). **Canadian Journal of Forest Research**, v.30, pp. 990-997, 2000.

FRÖHLICH, C.; METTENLEITER, M.. Terrestrial *laser scanning* – new perspectives in 3D surveying. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Freiburg, v. 36, n. 8/W2, p. 7 -13, oct. 2004.

GATZIOLIS, D.; POPESCU, S.; SHERIDAN, R.; KU, N..Evaluation of terrestrial lidar technology for the development of local tree volume equations. In: **SILVILASER 10º**. Freiburg. **Proceedings...** Freiburg, 2010. 1 CD-ROM.

PIMENTEL GOMES, F.; GARCIA, C.H.. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.

GONÇALES, R.. **Dispositivo de varredura laser 3D terrestre e suas aplicações na Engenharia, com ênfase em túneis**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GORTE, B.; WINTERHALDER, D.. Reconstruction of *laser-scanned* trees using filter operations in the 3D raster domain. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, 8/w2. Freiburg, 2004.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.. Tudo sobre os Átomos. In: HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.. **Fundamentos de física**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. p. 258 – 260. v.4

HENNING, J. G.; RADTKE, P. J.. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. **Forest Science**, v. 1, n. 52, p. 67-80, 2006.

HOPKINSON, L. CHASMER, L.; YOUNG-POW, C.; TREITZ, P.. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. **Can. J. For. Res.**, v. 34, p. 573-583, 2004.

KIRÁLY G.; BROLLY G.. Tree height estimation methods for terrestrial *laser* scanning in a forest reserve. **IAPRS**, v. 36, p. 211-215, 2007.

KIRÁLY, G; BROLLY, G.. Volume calculations of single trees based on terrestrial *laser* scanning. In: SILVILASER, 10^o, 2010, Freiburg. **Proceedings...** Freiburg, 2010. 1 CD-ROM.

KOEHLER, H. S. **Estatística experimental**. 2 ed. Curitiba: UFPR, 1996. 124 p.

KROOKS, A.; HYYPPÄ, J.; LYYTIKÄINEN-SAARENMAA, P.; JAAKKOLA, A.; KAASALAINEN, S.; HOLOPAINEN, M.. Monitoring forest defoliation with terrestrial *laser* scanning. In: SILVILASER, 10^o., 2010, Freiburg. **Proceedings...** Freiburg, 2010. 1 CD-ROM.

LALONDE, J. F.; VANDAPEL, N.; HEBERT, M.. **Automatic three-dimensional point cloud processing for Forest inventory**. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2006.

LIANG, X.; LITKEY, P.; HYYPPA, J.; KUKKO, A.; KAARTINEN, H.; HOLOPAINEN, M.. Plot-level trunk detection and reconstruction using one scan mode terrestrial *laser* scanning data. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON EARTH OBSERVATION AND REMOTE SENSING APPLICATIONS, 2008, Beijing, 2008.

LICHTI, D.D.; GORDON, S.J.; STEWART, M.P. . Ground-based *laser scanners*: operation, systems applications. **Geomatica**, v. 56, p. 21-33, 2002.

LICHTI, D. D.; STEWART, M.P.; TSAKIRI, M.; SNOW, A.J.. Benchmark tests on a three-dimensional *laser* scanning system. **Geomat. Res. Aust**, v. 72, p. 1-23, 2000.

LICHTI, D.; PFEIFER, N.; MAAS, H. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing theme issue "Terrestrial *Laser* Scanning". **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 63. p. 1-3, 2008 (Editorial).

LINGNAU, C.; SILVA, M.N.; SANTOS, D. S. dos; MACHADO, L. M.; LIMA, J.G.S.. Mensuração de alturas de árvores individuais a partir de dados *laser* terrestre. **Ambiência**, Guarapuava, v. 4, p. 85-96, 2008.

LINGNAU, C.; NAKAJIMA, N. Y.; DAMAS, B.; SANTOS, D. S. DOS; VINHAL, L. A.. Obtenção de parâmetros florestais através de *laser* terrestre – Novas perspectivas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007.

LINGNAU, C.; MACHADO, A. M. L.; BAVARESCO JUNIOR, A.; COLLA, F. L.. Determinação de diâmetros em diferentes alturas de árvores individuais a partir de dados *laser* terrestre. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...**Natal: INPE 2009. p. 5031 – 5038.

LITKEY, P.; LIANG, X. HYYPPÄ, J.; KUKKO, A.; KAARTINEN, H.; HOLOPAINEN, M.. Single-scan TLS methods for Forest parameter retrieval. In: SILVILASER 2008. Edinburgh UK. p. 295 – 304, 2008.

LOUDERMILK, E. L.; SINGHANIA, A.; FERNANDEZ, J. C.; HIERS, J. K.; O'BRIEN, J. J.; CROPPER JR, W. P.; SLATTON, K. C.; MITCHELL, R. J.; . Application of ground-based LiDAR for fine-scale forest fuel modeling. In: BUTLER, B. W.; COOK, W.. (Eds) The fire environment—innovations, management, and policy. CONFERENCE PROCEEDINGS 2007. Destin, FL. **Proceedings...** Fort Collins: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 26–30 March 2007, p. 662.

MAAS, H.-G.; BIENERT, A.; SCHELLER, S.; KEANE, E.. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial *laser scanner* data. **International journal of remote sensing**, v. 29, n. 5, p. 1579–1593, 2008.

MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO FILHO, A.. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava: UNICENTRO, 2006.

MACHADO, S. do A.; NADOLNY, M.C. Comparação de métodos de cubagem de árvores e de diversos comprimentos de seção. In Congresso Florestal e do Meio Ambiente do Paraná, 3º. **Anais.....** Curitiba. Associação Paranaense de Engenheiros Florestais, Curitiba, pp. 89-104. 1991. V. 1

MÁRQUEZ, A.. **Un tratado sobre el escaner terrestre TLS**. Mecinca, 2010. Disponível em: <<http://www.mecinca.com/papers/EscanerTLS.pdf>>. Acesso em: 03 fev. 2011.

PARKER, G. G.; HARDING, D. J.; BERGER, M. L.. Aportable LiDAR system for rapid determination of forest canopy structure. **Journal of Applied Ecology**, v. 41, p. 755-767, 2004.

PEREIRA, A. R.; PEREIRA, R. G. Extração automática de árvores e áreas de seções transversais a partir de dados *laser* terrestre. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Cartográfica). Departamento de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal do Paraná, 2009.

PFEIFER, N.; GORTE, B.; WINTERHALDER, D.. Automatic reconstruction of single trees from terrestrial *laser scanner* data. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS)**, v. 35, n. 5, part b, p. 114 – 119, 2004. Disponível em: <<http://www.ipf.tuwien.ac.at/np/Publications/pfeifer-istanbul-treereco.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2009.

PFEIFER, N.; WINTERHALDER, D.. Modelling of tree cross sections from terrestrial *laser scanning* data with free-form curves. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 8/w2. Freiburg, 2004.

POPESCU, S. C. **Estimating plot-level forest biophysical parameters using small-footprint airborne lidar measurements**. 2002. 115 f. Tese (Doutorado em Floresta) – Departement of Florestry, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, 2002.

POPESCU, S. C.. Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar. **Biomass and Bioenergy**, v. 3, n. 9, p. 646-655, set. 2007.

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P.. **Mensura forestal**. San José: Instituto Interamericano de coperación para la agricultura, 1997.

PUTTONEN, E.; LITKEY, P.; LIANG, X.; KAARTINEN, H.; KUKKO, A.. Single tree canopy projection area extraction from single-scan terrestrial *laser scanner* data. In: SILVILASER 2010, 10., 2010, Freiburg. **Proceedings...** Freiburg: SILVILASER 2010. 1 CD-ROM.

SCHÜTT, C.; ASCHOFF, T.; WINTERHALDER, D.; THIES, M.; KRETSCHMER, U.; SPIECKER, H.. Approaches for recognition of wood quality of standing trees based on terrestrial *laserscanner* data. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES (ISPRS), 'LASER-SCANNERS FOR FOREST AND LANDSCAPE ASSESSMENT', 2004, Freiburg, Germany. **Proceedings...** Freiburg: ISPRS, 2004.

p. 179-182. Disponível em
<http://www.isprs.org/commission8/workshop_laser_forest/>. Acesso em: 25 set. 2007.

SILVA, M. N.; BUCK, A. L. B.; LINGNAU, C.; MACHADO, A. M. L.; MIRANDA, B. P. Varredura com *laser* terrestre para determinação das variáveis dendrométricas da *Araucaria angustifolia*. . In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...**Curitiba: INPE 2011. p. 5509 – 5516.

SIMONSE, M.; ASCHOFF, T.; SPIECKER, H.; THIES, M. Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial *laser* scanning. **Proceedings of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests**, Umeå/Sweden,. p. 251- 257, 2003.

THIES, M.; SPIECKER, H.. Evaluation and future prospects of terrestrial *laser* scanning for standardized forest inventories. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXVI – 8/w2. Freiburg, 2004.

TMFOREST. Disponível em: <<http://www.tmforest.com>>. Acesso em: 28 set. 2011.

VAN DER ZANDE, D.; STUCKENS, J.; VERSTRAETEN, W. W.; MUYS, B.; COPPIN, P.. Assessment of light environment variability in broadleaved forest canopies using terrestrial *laser* scanning. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1564-1574, 2010.

VIEIRA, S. **Introdução a bioestatística**.Rio de Janeiro: Campus, 1991.

VIEIRA, S., HOFFMANN, R. **Estatística experimental**. São Paulo: Atlas, 1989.

WEZYK, P.; KOZIOL, K.; GLISTA, M.; PIERZCHALSKI, M.. Terrestrial *laser* scanning versus traditional forest inventory first results from the polish forests. **ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007**, p. 424 -429. Finland, 2007.

WUTKE, J. D.. **Métodos para avaliação de um sistema laser scanner terrestre**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

ZANDONÁ, D.. **Potencial uso de dados provenientes de laser scanner aerotransportado para extração de variáveis dendrométricas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.